

**STUDI PENGENDALIAN FREKUENSI DAN TEGANGAN  
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP SURALAYA  
MENGUNAKAN  
KONTROL ADAPTIF SWA-TALA**

**TUGAS AKHIR**

Disusun oleh :

**SAPTONO TRI NUGROHO**

**NRP. 2290100010**

RSE

629.836

Nug

S-1

1996



**JURUSAN TEKNIK ELEKTRO  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
1996**

PERPUSTAKAAN ITS	
Tgl. Terima	15 JAN 1997
Terima Dari	H
No. Agenda Prp.	6830

**STUDI PENGENDALIAN FREKUENSI DAN TEGANGAN  
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA UAP SURALAYA  
MENGUNAKAN  
KONTROL ADAPTIF SWA-TALA**

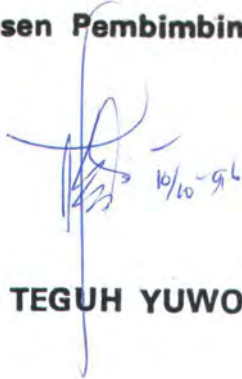
**TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagian Persyaratan  
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
Pada**

**Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga  
Jurusan Teknik Elektro  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
S u r a b a y a**

**Mengetahui / Menyetujui**

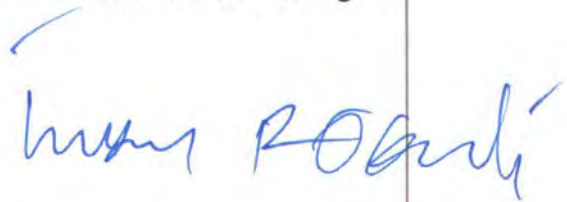
**Dosen Pembimbing I**



10/10-96

**(Ir. TEGUH YUWONO)**

**Dosen Pembimbing II**



**(Ir. IMAM ROBANDI, M.T.)**

**S U R A B A Y A  
September , 1996**





# **TUGAS AKHIR**

**ABSTRAK**

## ABSTRAK

Gangguan kecil pada sistem tenaga listrik dapat berakibat pada kinerja dinamik sistem (frekuensi dan tegangan) menjadi tidak baik, bahkan dapat membawa sistem menuju daerah yang tidak stabil. Gangguan dinamik itu disebabkan oleh perubahan beban yang relatif kecil sehingga timbul ayunan sebelum sistem kembali pada keadaan stabil. Agar tercapai efisiensi energi maupun waktu perlu dilakukan suatu perbaikan pada kinerja dinamiknya. Perbaikan ini dapat diupayakan dengan menerapkan kontrol adaptif swatara.

Pada studi ini kontrol adaptif swatara diterapkan pada sisi turbin dan sisi eksitasi menggunakan strategi kontrol minimum variansi yang diperumum dilengkapi dengan estimator kuadrat terkecil secara rekursif. Estimator ini mengestimasi parameter-parameter sistem yang berubah akibat adanya gangguan. Parameter-parameter hasil estimasi tersebut merupakan informasi untuk mendesain sinyal kontrol yang diperlukan untuk menetralkan gangguan. Akibatnya ayunan yang terjadi dapat segera diredam agar sistem segera mencapai keadaan stabil.

Kasus yang diambil adalah PLTU Suralaya yang merupakan salah satu penyuplai utama tenaga listrik interkoneksi Jawa-Bali.





# **TUGAS AKHIR**

**KATA PENGANTAR**

# KATA PENGANTAR

Assalamualaikum wr. wb.

Alhamdulillah, dengan rahmad Allah SWT dan restu orang tua, buku tugas akhir ini dapat terselesaikan. Buku tugas akhir ini berjudul *Studi Pengendalian Frekuensi dan Tegangan pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap Suralaya Menggunakan Kontrol Adaptif Swatara*. Tugas akhir ini disusun untuk memenuhi salah satu persyaratan dalam memperoleh gelar sarjana pada bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis menyadari bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna mengingat kemampuan dan keterbatasan yang ada pada diri penulis. Oleh karena itu penulis mengucapkan terima kasih apabila ada yang berkenan memberikan kritik dan saran demi kesempurnaan tugas akhir ini.

Akhir kata penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi almamater dan bangsa Indonesia.

Wassalamualaikum wr. wb.

Surabaya, September 1996

Penulis





# **TUGAS AKHIR**

**UCAPAN TERIMA KASIH**



## UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan selesainya tugas akhir ini , penulis mengucapkan rasa terima kasih yang tulus kepada :

1. Bapak *Dr. Ir. Salehudin, M.Eng. Sc.*, selaku Ketua Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
2. Bapak *Ir. Sidaryanto*, selaku Koordinator Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
3. Bapak *Dr. Ir. Soebagio*, selaku Dosen Wali yang telah banyak memberikan nasehat kepada penulis dalam proses perkuliahan hingga tersusunnya Tugas Akhir ini
4. Bapak *Ir. Teguh Yuwono* selaku dosen pembimbing I dan Bapak *Ir. Imam Robandi, MT* selaku dosen pembimbing II yang telah meluangkan waktu untuk memberikan bimbingan dan pengarahan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
5. Bapak *Ir. Rusdhianto Effendi, M.T.*, dosen Bidang Studi Sistem Pengaturan, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, yang telah memberikan petunjuk yang sangat berharga.
6. Bapak *Yusuf Iyudin* dari PT. PLN (PERSERO) PLTU SURALAYA yang telah memberikan bimbingan dan bantuan data yang diperlukan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
7. Bapak *Ir. Edy Suwanto, MT* selaku dosen Politeknik Elektro Universitas Diponegoro Semarang yang telah memberikan data yang diperlukan dalam penyusunan Tugas Akhir ini.
8. Ibuku dan Saudara-saudaraku yang telah memberikan dukungan mental dan moril demi selesainya Tugas Akhir ini.
9. Rekan-rekanku *Yudi Bachtiar, Darmawan P dan Darmawan W. Iwa. Must, Gendi, Teguh, Yudi* dan rekan Control Club lainnya.
10. Berbagi pihak yang telah membantu terselesaikannya Tugas Akhir ini yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu.

Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis. Amin





# **TUGAS AKHIR**

**DAFTAR ISI**

# DAFTAR ISI

ABSTRAK .....	i
KATA PENGANTAR .....	ii
UCAPAN TERIMA KASIH .....	iii
DAFTAR ISI .....	iv
DAFTAR GAMBAR .....	vii
DAFTAR TABEL .....	ix
DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN .....	x
<b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 LATAR BELAKANG .....	1
1.2 PERMASALAHAN .....	2
1.3 PEMBatasan MASALAH .....	3
1.4 METODE PEMECAHAN MASALAH .....	3
1.5 SISTEMATIKA PEMBAHASAN .....	4
1.6 RELEVANSI .....	5
<b>BAB II PENGENDALI ADAPTIF SWATALA .....</b>	<b>6</b>
2.1. SISTEM PENGENDALI ADAPTIF .....	6
2.1.1. Pengertian Sistem Pengendali Adaptif .....	6
2.1.2. Sistem Pengendali Adaptif Swatala .....	9
2.2. IDENTIFIKASI PARAMETER .....	10
2.3. VARIANSI MINIMUM YANG DIPERUMUM .....	17
<b>BAB III PEMODELAN DINAMIK LINIER SISTEM PLTU</b>	
<b>SURALAYA .....</b>	<b>23</b>
3.1. MODEL MESIN SINKRON .....	23



3.1.1. Pemodelan Sistem Eksitasi PLTU Suralaya -----	23
3.1.2. Pemodelan Turbin -----	25
3.1.3. Persamaan Dasar Torsi Mekanik -----	26
3.1.4. Persamaan Dasar Medan -----	28
3.1.5. Persamaan Tegangan Terminal -----	30
3.1.6. Persamaan Daya Elektrik -----	30
3.1.7. Persamaan Arus -----	31
3.1.8. Pemodelan Persamaan Elektromekanik -----	34
3.1.9. Pemodelan Persamaan Tegangan Terminal -----	34
3.1.10. Pemodelan Persamaan Daya Elektrik -----	35
3.1.11. Pemodelan Persamaan Medan -----	36
3.1.12. Model Linier Mesin Tunggal Keseluruhan -----	37
3.2. PERSAMAAN KEADAAN DAN PERSAMAAN	
OUTPUT -----	38
3.2.1. Komponen Matriks A -----	39
3.2.2. Komponen Matriks B -----	41
3.2.3. Komponen Matriks C -----	43
<b>BAB IV SIMULASI DAN ANALISIS -----</b>	<b>45</b>
4.1. ALGORITMA -----	45
4.1.1. Penerapan Perubahan Beban $\Delta P_L$ -----	47
4.2. SIMULASI -----	51
4.3. DATA -----	54
4.3.1. Data Parameter Generator -----	54
4.3.2. Data Impedansi Saluran -----	54
4.4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN -----	55
4.4.1. Masukan Gangguan 1 -----	55
4.4.2. Masukan Gangguan 2 -----	59

<b>BAB V PENUTUP</b>	-----	65
5.1. KESIMPULAN	-----	65
5.2. SARAN	-----	65
<b>DAFTAR PUSTAKA</b>	-----	66

LAMPIRAN A

LAMPIRAN B

LAMPIRAN C

LAMPIRAN D





# **TUGAS AKHIR**

**DAFTAR GAMBAR**

**GAMBAR****HALAMAN**

4.2.	Diagram blok mesin tunggal disertai gangguan -----	47
4.3.	Sinyal gangguan 1 unit step ( $\Delta P_L = 0.005$ pu) -----	52
4.4.	Sinyal gangguan 2 unit step beramplitudo ( $\Delta P_L = u(t) + 0.01 e(t)$ pu) ---	52
4.5.	Sinyal keluaran frekuensi dengan masukan ganggan 1 -----	57
4.6.	Sinyal keluaran tegangan dengan masukan ganggan 1 -----	58
4.5.	Sinyal keluaran frekuensi dengan masukan ganggan 2 -----	61
4.5.	Sinyal keluaran tegangan dengan masukan ganggan 2 -----	62



<b>GAMBAR</b>	<b>HALAMAN</b>
4.2. Diagram blok mesin tunggal disertai gangguan -----	47
4.3. Sinyal gangguan 1 unit step ( $\Delta P_L = 0.005$ pu) -----	52
4.4. Sinyal gangguan 2 unit step beramplitudo ( $\Delta P_L = u(t) + 0.01 e(t)$ pu) ---	52
4.5. Sinyal keluaran frekuensi dengan masukan ganggan 1 -----	57
4.6. Sinyal keluaran tegangan dengan masukan ganggan 1 -----	58
4.5. Sinyal keluaran frekuensi dengan masukan ganggan 2 -----	61
4.5. Sinyal keluaran tegangan dengan masukan ganggan 2 -----	62



# **TUGAS AKHIR**

**DAFTAR TABEL**



## DAFTAR TABEL

TABEL	HALAMAN
4.1. Data Parameter Generator Unit I -----	54
4.2. Data Inpedansi Saluran -----	54
4.3. Perbandingan keluaran dengan dan tanpa kontrol adaptif dengan masukan gangguan 1 -----	56
4.4.a. Perbandingan perubahan frekuensi dengan dan tanpa kontrol adaptif masukan gangguan 2 -----	60
4.4.b. Perbandingan perubahan tegangan terminal dengan dan tanpa kontrol adaptif masukan gangguan 2 -----	60



# **TUGAS AKHIR**

**DAFTAR LAMBANG  
DAN SINGKATAN**



## DAFTAR LAMBANG DAN SINGKATAN

### 1. SISTEM PENGENDALIAN FREKUENSI DAN TEGANGAN

$I$	: arus (pu).
$I_q$	: arus sumbu direct (pu).
$I_d$	: arus sumbu quadrature (pu).
$j$	: menyatakan bilangan khayal.
$K_A$	: penguat amplifier
$K_E$	: penguat exciter
$K_F$	: penguat filter
$K_{gu}$	: penguatan governor uap.
$M$	: konstanta inersia.
$R$	: konstanta pengaturan turbin (rad/N.m.s).
$s$	: transformasi Laplace.
$T_m$	: torsi mekanik.
$T_e$	: torsi listrik.
$T_{do'}$	: konstanta waktu transien generator (detik).
$T_{gu}$	: konstanta waktu governor uap.
$T_{tu}$	: konstanta waktu turbin uap.
$U_1$	: sinyal kontrol sisi turbin.
$U_2$	: sinyal kontrol sisi eksitasi.
$V_o$	: tegangan bus infinit (pu)

$V_t$	: tegangan terminal generator (pu).
$x_d$	: reaktansi sumbu direct (pu).
$x_q$	: reaktansi sumbu quadrature (pu).
$x'_d$	: reaktansi transien sumbu direct (pu).
$x'_q$	: reaktansi transien sumbu quadrature (pu).
$Y$	: level katup.
$\omega$	: frekuensi sudut.
$\omega_s$	: frekuensi sudut keadaan sinkron.
$\delta$	: sudut rotor.
$\pi$	: bilangan $22/7 = 3.14$
$\Sigma$	: simbol penjumlahan.
$\Delta$	: simbol perubahan kecil.
$\int$	: simbol integral.

## 2. SISTEM PENGENDALIAN ADAPTIF SWATALA

$A(q^{-1}), B(q^{-1}), C(q^{-1})$  : polinomial parameter model ARMAX.

$\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  : faktor pengabai (forgetting faktor).

$a_i$  : koefisien polinomial  $A(q^{-1})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_a$ .

$b_i$  : koefisien polinomial  $B(q^{-1})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_b$ .

$c_i$  : koefisien polinomial  $C(q^{-1})$ ,  $i = 1, 2, \dots, n_c$ .

$d$  : waktu tunda

$e(t)$  : sinyal derau putih



$\varepsilon^o(t)$	: kesalahan prakiraan apriori
$\varepsilon(t)$	: kesalahan prakiraan aposteriori
$E\{.\}$	: nilai harapan matematik
$F(t)$	: penguatan adaptasi
$F(q^{-1})$	: hasil bagi polinomial $C(q^{-1}) / A(q^{-1})$ .
$G(q^{-1})$	: sisa hasil bagi polinomial $C(q^{-1}) / A(q^{-1})$ .
$J$	: fungsi kriteria.
$\lambda$	: faktor pembobot sinyal kendali dengan integrator.
$\emptyset$	: vektor informasi regresi.
$\Phi$	: matriks informasi sistem
$q^{-1}$	: operator geser mundur persamaan beda.
$\theta$	: vektor parameter sistem.
$r(t)$	: sinyal acuan keluaran.
$r$	: konstanta pembobot sinyal kemdali.
$u(t)$	: sinyal masukan sistem.
$w$	: transformasi bilinier.
$y(t)$	: sinyal keluaran sistem.
$\hat{y}(t)$	: prediksi sinyal keluaran sistem.
$\hat{y}(t+d t)$	: prediksi sinyal d langkah kemudian.
$z$	: koefisien transformasi bilinier.

### 3. MODEL PERSAMAAN KEADAAN

$A$	:	matriks variabel keadaan.
$B$	:	matriks masukan.
$C$	:	matriks pengukuran.
$E$	:	matriks gangguan.
$I$	:	matriks identitas.
$t$	:	langkah pencuplikan.
$T$	:	waktu pencuplikan.
$u$	:	vektor masukan.
$u(t)$	:	vektor masukan sistem diskrit.
$w$	:	vektor gangguan.
$w(t)$	:	vektor gangguan sistem diskrit.
$y$	:	vektor keluaran.
$y(t)$	:	vektor keluaran sistem diskrit.
$x$	:	variabel keadaan.
$x(t)$	:	variabel keadaan sistem diskrit.





# **TUGAS AKHIR**

## **BAB I**

### **PENDAHULUAN**



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1. LATAR BELAKANG**

Dalam pengusahaan tenaga listrik, harus dipenuhi syarat-syarat kestabilan dan keandalan sistem tenaga listrik. Untuk itu segala bentuk gangguan baik yang bersifat transient maupun dinamik yang akan mengganggu syarat-syarat di atas harus dapat ditanggulangi oleh sistem. Gangguan yang disebut terakhir adalah gangguan yang disebabkan oleh perubahan beban yang kecil atau sering kali disebut dengan gangguan dinamik [1].

Beban sistem tenaga listrik besarnya sangat bervariasi tergantung dari pola pemakaian tenaga listrik oleh konsumen. Pembangkit tenaga listrik harus menyediakan daya yang sesuai dengan variasi beban tersebut. Tetapi kenyataannya pembangkit sulit menyesuaikan keluaran daya dengan cepat sesuai dengan variasi beban yang ada.

Pada mesin pembangkit tenaga listrik diperlukan daya mekanis ( $P_m$ ) sebagai masukan dan dihasilkan daya listrik ( $P_e$ ) sebagai keluaran. Daya listrik ini dikendalikan oleh konsumen dalam bentuk pemakaian tenaga listrik sehingga selalu berubah-ubah, maka tidak akan pernah diperoleh keadaan daya mekanis ( $P_m$ ) sama dengan daya listrik ( $P_e$ ). Satu-satunya cara agar diperoleh keseimbangan antara  $P_m$  dan  $P_e$  adalah dengan melakukan pengaturan  $P_m$ . Tetapi secepat apapun pengaturan  $P_m$  sulit didapatkan  $P_m$  sama dengan  $P_e$  sepanjang waktu, karena adanya



pengaruh inersia turbin generator, sumber energi dan lain-lain. Dengan demikian selalu didapat keadaan tidak seimbang antara energi yang diperlukan dengan energi yang dihasilkan sehingga menyebabkan frekuensi berisilasi di sekitar frekuensi nominal. Dengan kata lain, perubahan-perubahan beban yang kecil akan mengakibatkan kestabilan sistem tenaga listrik berisilasi di sekitar titik kerjanya. Kondisi ini merupakan gangguan yang sering kali disebut dengan gangguan dinamik (frekuensi dan tegangan), yang pada akhirnya akan membawa sistem pada keadaan tidak stabil.

## **1.2. PERMASALAHAN**

Setelah melihat latar belakang di atas dapat dirumuskan permasalahan utama yaitu bagaimana mendapatkan cara untuk mengendalikan frekuensi dan tegangan mesin pembangkit tenaga listrik agar setiap perubahan beban yang kecil dapat diredam efek ayunan rotor generatornya, sehingga akan diperoleh penampilan keluaran frekuensi dan tegangan yang lebih baik.

Dari pengamatan karakteristik mesin pembangkit tenaga listrik dan gangguan dinamiknya akan diupayakan pemakaian kontrol adaptif swatela yang secara terus menerus (on line) mendeteksi perubahan beban yang terjadi dan memperkecil efek perubahan beban itu agar diperoleh keadaan yang sesuai dengan syarat kestabilan sistem tenaga listrik.

### 1.3. PEMBATAAN MASALAH

Supaya pembahasan tidak meluas, Tugas Akhir ini dibatasi oleh lingkup permasalahan sebagai berikut :

1. Mesin pembangkit listrik pada PLTU Suralaya dianggap mesin tunggal terhubung dengan bus infinit dan merupakan sistem yang seimbang.
2. Gangguan yang berupa perubahan beban merupakan perubahan beban kecil (dinamik), sedangkan gangguan selain perubahan beban diwakili oleh unsur derau (white noise).
3. Penelitian ini hanya terbatas pada pemodelan, perancangan estimator dan kontroler serta menyimulasikan hasilnya tetapi tidak termasuk implementasi pada sistem sebenarnya.

### 1.4. METODE PEMECAHAN MASALAH

Metode kontrol adaptif swatela merupakan strategi kontrol untuk mendapatkan sinyal kontrol  $u(t)$  yang diinputkan pada plant  $P(s)$  sedemikian rupa agar diperoleh keluaran sistem sesuai dengan yang diinginkan. Metode yang ditempuh dalam melakukan penelitian ini sesuai dengan urutan berikut ini :

Pertama adalah membentuk model matematik sistem yang meliputi turbin dan pengendaliannya, mesin sinkron, jaringan dan sistem eksitasi.

Kedua adalah menyusun model matematik dalam bentuk persamaan keadaan yaitu :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \text{ dan } y(t) = Cx(t)$$



dengan,

$x(t)$ : vektor variabel keadaan ;  $A$  : matrik variabel keadaan

$u(t)$  : vektor variabel masukan ;  $B$  : matrik masukan

$y(t)$  : vektor variabel pengukuran ;  $C$  : matrik pengukuran

Ketiga adalah memasukan suatu model gangguan perubahan beban yang akan merubah persamaan keadaan di atas menjadi dalam bentuk ARMAX sebagai berikut :

$$A(q^{-1})y(t) = B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t)$$

dengan  $y$  adalah keluaran dan  $u$  adalah masukan dan  $e$  gangguan.

Keempat adalah proses estimasi yang menggunakan metode *Extended Least Square* dan proses pengendalian yang menggunakan *Metode Variansi Minimum yang Diperumum*. Selanjutnya ditampilkan simulasi perubahan sinyal output, yaitu output frekuensi dan output tegangan.

## 1.5. SISTEMATIKA PEMBAHASAN

Dalam penulisan tugas akhir ini terdiri dari 5 bab, yang terdiri dari Bab 1 berupa pendahuluan, pengendali swa-tala disajikan dalam Bab 2, Bab 3 berisi tentang pemodelan mesin tunggal di PLTU Suralaya, Bab 4 dibahas tentang simulasi dan analisisnya, diakhiri oleh Bab 5 yang berisi kesimpulan dari pembahasan yang telah dilakukan.

## 1.6. RELEVANSI

Dengan diselesaikannya tugas akhir ini diharapkan dapat memberikan alternatif perbaikan unjuk kerja akibat dinamika sistem tenaga listrik mesin tunggal dengan menggunakan sistem kendali swa-tala. Dan juga diharapkan agar tugas akhir ini dapat dipakai sebagai bahan pertimbangan untuk pengembangan sistem kelistrikan diwaktu yang akan datang.





# **TUGAS AKHIR**

## **BAB II**

### **PENGENDALI ADAPTIF SWATALA**

## **BAB II**

# **PENGENDALI ADAPTIF SWATALA**

### **2.1. SISTEM PENGENDALI ADAPTIF**

#### **2.1.1. Pengertian Sistem Pengendali Adaptif**

Gagasan tentang sistem pengendali adaptif mengacu pada aspek adaptif perilaku manusia. Kemudian dikembangkan sistem yang mempunyai kemampuan adaptasi yang mirip dengan sifat adaptif manusia tersebut. Sistem ini mampu menyesuaikan diri dengan lingkungannya dalam upaya menjaga performansinya agar sesuai dengan keadaan yang diinginkan.

Sistem adaptif adalah sistem pengendali yang secara kontinyu dan otomatis mengukur karakteristik dinamik plant dan membandingkannya dengan karakteristik dinamik yang diinginkan, dan menggunakan selisih ini untuk mengubah parameter sistem yang dapat diatur atau untuk membangkitkan sinyal kendali sedemikian rupa sehingga dapat dijaga performansi optimal tanpa menghiraukan perubahan lingkungan sekelilingnya atau dengan kata lain, merupakan sistem pengendali yang secara kontinyu mengukur performansi dirinya sesuai dengan indeks performansi yang diberikan, dan jika diperlukan, memodifikasi parameter sistem untuk menjaga performansi optimal tanpa menghiraukan perubahan sekeliling.



Suatu sistem adaptif mempunyai ciri-ciri pengorganisasian diri. Jika karakteristik plant tidak diketahui secara sempurna, karena parameternya berubah secara acak atau karena pengaruh perubahan lingkungan pada karakteristik dinamik plant, maka prosedur identifikasi, pengambilan keputusan dan modifikasi perlu dilakukan secara kontinyu atau setiap selang waktu tertentu, tergantung pada kecepatan perubahan parameternya. Proses redesain atau pengorganisasian diri ini diperlukan untuk mengkompensasi perubahan-perubahan dalam plant, sehingga didapatkan aspek performansi yang baik.

Pada dasarnya sistem pengendali adaptif mempunyai tiga fungsi, yaitu :

1. Mengidentifikasi karakteristik dinamik plant.
2. Pengambilan keputusan yang didasarkan pada identifikasi plant.
3. Melakukan modifikasi atau memberikan sinyal kendali berdasarkan keputusan yang diambil.

Adapun diagram blok konfigurasi dasar sistem pengendali adaptif ditunjukkan pada gambar (2.1).

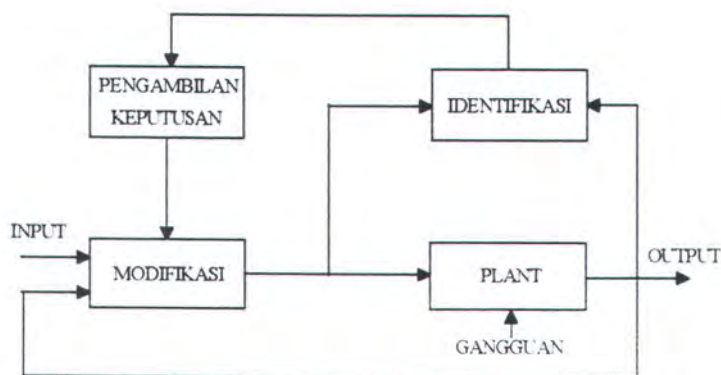
Bila terjadi perubahan parameter plant akibat gangguan dari lingkungan, pada proses identifikasi terjadi perubahan sebagai reaksi adanya perubahan parameter ini. Proses identifikasi ini akan memberikan hasil estimasi, yang selanjutnya digunakan untuk menentukan sinyal kendali sebagai input proses. Untuk merealisasikan sistem pengendali adaptif, secara umum dibagi menjadi tiga pendekatan, yaitu [5]

1. Gain Schedulling.
2. Model Referensi Adaptif Control ( MRAC ).
3. Self Tuning Regulator (Pengendali Swatala)

Dari ketiga pendekatan di atas terdapat kesamaan, yaitu selalu terdiri dari dua loop, yaitu [10] :

- ☐ loop tertutup ( feedback )
- ☐ loop adaptif .

Loop tertutup mempunyai fungsi untuk membangkitkan sinyal kendali yang disebabkan error yang terjadi antara output proses dan input referensi atau set point yang diinginkan. Sedangkan loop adaptif berfungsi untuk penyesuaian parameter bila terjadi perubahan akibat gangguan sehingga sistem tetap dalam performansi optimalnya.

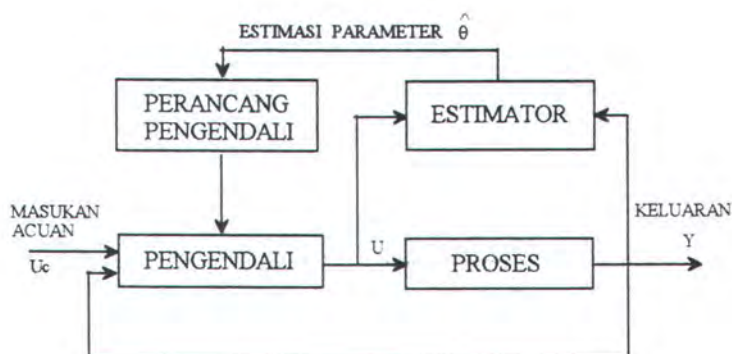


**Gambar 2.1.** Diagram blok sistem pengendali adaptif [5].



### 2.1.2. Sistem Pengendali Swatala

Sistem pengendali adaptif swatala dirancang untuk mengendalikan proses-proses yang mempunyai parameter-parameter yang tidak diketahui. Parameter-parameter itu umumnya berubah-ubah setiap saat. Salah satu upaya untuk merealisasikan sistem pengendali adaptif swatala ini adalah dengan pendekatan estimasi parameter-parameter proses yang dilakukan dalam kawasan waktu nyata. Selanjutnya parameter-parameter pengendali disesuaikan pada setiap selang pencacaaan berdasarkan estimasi parameter-parameter proses.



**Gambar 2.2.** Diagram blok pengendali swatala [5].

Proses pengestimasian dan pengendalian dilaksanakan secara terpisah sehingga proses pengendalian dilaksanakan berdasarkan asumsi bahwa parameter-parameter proses hasil estimasi merupakan parameter-parameter yang sebenarnya tanpa memperdulikan efek ketidakpastian estimasi.

## 2.2. IDENTIFIKASI PARAMETER [5]

Sistem secara matematis dibagi menjadi sistem deterministik dan sistem stokastik. Tetapi di dalam kehidupan sehari-hari sistem stokastik adalah yang paling dominan. Faktor-faktor gangguan sistem baik berupa gangguan besar maupun gangguan kecil yang bersifat dinamik sering kali menyertai sistem-sistem dalam kehidupan sehari-hari.

Dalam tugas akhir ini yang dibahas adalah upaya penanggulangan gangguan kecil yang bersifat dinamik, menggunakan model proses tidak linear yang dipengaruhi pengendali dari suatu data yang dicacah dan dipengaruhi gangguan. Untuk menggambarkan perilaku proses ini metode yang biasa digunakan adalah dengan melinearkan model tersebut. Representasi sistem tersebut dalam waktu diskrit dinyatakan dalam bentuk ARMAX (*Auto Regressive Moving Average Exogeneous*) dengan masukan dan keluaran tunggal (SISO = *single input single output*) .

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d} B(q^{-1})u(t) + C(q^{-1})e(t) \quad (2.1)$$

dengan :

$$A(q^{-1}) = 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{na} q^{-na} = 1 + \sum_{i=1}^{na} a_i q^{-i} \quad (2.2.a)$$

$$B(q^{-1}) = b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{nb} q^{-nb} = \sum_{i=0}^{nb} b_i q^{-i} \quad (2.2.b)$$

$$C(q^{-1}) = 1 + c_1 q^{-1} + \dots + c_{nc} q^{-nc} = 1 + \sum_{i=1}^{nc} c_i q^{-i} \quad (2.2.c)$$

$y(t)$  = sinyal keluaran

$u(t)$  = sinyal masukan

$e(t)$  = derau putih tidak berkorelasi

$d$  = waktu tunda

$q^{-1}$  = operator geser mundur



Penulisan model waktu diskrit persamaan (2.1) tidak menggunakan variabel kompleks  $z$  melainkan operator geser mundur  $q^{-1}$ , karena variabel waktu kompleks hanya berlaku untuk sistem invarian waktu linear. Dalam pengendalian swatara sistem dianggap linear time varying (varian waktu linear) pada tiap-tiap selang waktu pencacahan sehingga lebih sesuai bila digunakan operator yang menunjukkan waktu pergeseran pencacahan.

Untuk identifikasi parameter penulisan struktur model ARMAX seringkali dituliskan dalam bentuk regresi linear sebagai berikut :

$$y(t) = \theta^T \phi(t-1) + e(t) \quad (2.3)$$

dengan

$\{e(t)\} = N[0, \sigma_e^2]$  : sinyal derau putih dengan rata-rata 0 dan variansi  $\sigma_e^2$

$\theta$  : vektor (kolom) parameter.

$\phi(t-1)$  : vektor (kolom) informasi (regresi).

Sebagai gambaran untuk sistem ARMAX seperti pada persamaan (2.1) diperoleh berturut-turut vektor parameter serta vektor informasi sistem :

$$\theta = [a_1 \dots a_{na} \quad b_1 \dots b_{nb} \quad c_1 \dots c_{nc}] \quad (2.4)$$

$$\phi(t-1) = [-y(t-1) \dots -y(t-na) \quad u(t-1-d) \dots u(t-nb-d)$$

$$e(t-1) \dots e(t-nc)]^T \quad (2.5)$$

Dari persamaan tersebut di atas dapat ditentukan orde sistem dalam regresi linear adalah jumlah orde polinom A, B, C atau ( $n = n_a + n_b + n_c$ ).

Identifikasi parameter menggunakan prinsip kuadrat terkecil (*least square*) yaitu bagaimana memilih parameter yang tidak diketahui dari suatu model sedemikian rupa sehingga jumlah kuadrat dari selisih antara harga yang terukur dengan harga yang dihitung dari model dikalikan dengan harga yang menunjukkan tingkat ketepatan akan mencapai harga minimum. Identifikasi dilakukan dalam waktu nyata yang diharapkan dapat memberikan hasil secara rekursif sesuai dengan hasil pengukuran yang diperoleh. Estimasi parameter ini digunakan untuk memperoleh parameter-parameter proses yang tidak diketahui atau yang berubah terhadap waktu.

Variabel keluaran hasil estimasi dinyatakan dalam bentuk :

$$\hat{y}(t) = \hat{\theta}^T(t) \phi(t-1) \quad (2.6)$$

$\hat{\theta}(t)$  adalah hasil estimasi terbaik dari vektor parameter sistem pada saat  $t$ , sehingga kesalahan prediksi adalah :

$$\varepsilon(t) = y(t) - \hat{\theta}^T(t) \phi(t-1) \quad (2.7)$$

Kriteria estimasi kuadrat terkecil diukur dari fungsi kriteria  $J(t)$  yang didefinisikan sebagai jumlah kuadrat dari kesalahan estimasi.

$$J(t) = \sum_{i=1}^t (\varepsilon(i))^2 \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (2.8)$$



Selanjutnya dengan N pengukuran , diperoleh harga fungsi kriteria :

$$J(t) = [Y - \Phi \hat{\theta}(t)]^T [Y - \Phi \hat{\theta}(t)] \quad (2.9)$$

dengan Y adalah vektor informasi keluaran sistem :

$$Y = [y(1) \ y(2) \ \dots y(N)] \quad (2.10)$$

sedang  $\Phi$  adalah matriks informasi sistem :

$$\Phi = [\phi^T(0) \ \phi^T(1) \ \phi^T(2) \ \dots \phi^T(N-1)] \quad (2.11)$$

Sesuai dengan strategi estimasi optimal, parameter sistem terbaik akan diperoleh jika harga fungsi kriteria (3.9) adalah minimum terhadap  $\theta$ .

$$\frac{\partial J(t)}{\partial \theta(t)} = 0 \quad (2.12)$$

Sehingga diperoleh persamaan normal :

$$(\Phi^T \Phi) \hat{\theta}(t) = \Phi^T Y \quad (2.13)$$

atau diperoleh estimasi parameter sistem :

$$\hat{\theta}(t) = (\Phi^T \Phi)^{-1} \Phi^T Y \quad (2.14)$$

Metode kuadrat terkecil rekursif (RLS = Recursive Least Square) dengan kriteria (2.8) diturunkan dari formula estimasi non recursive (2.14) diperoleh sebagai berikut :

$$\hat{\theta}(t) = \left[ \sum_{i=1}^t \phi(i-1)\phi^T(i-1) \right]^{-1} \sum_{i=1}^t \phi(i-1)y(i) \quad (2.15)$$

Dengan  $F(t)$  adalah penguat adaptasi dan  $\varepsilon^0(t)$  kesalahan *a priori*

$$F^{-1}(t) = \left[ \sum_{i=1}^t \phi(i-1)\phi^T(i-1) \right] \quad (2.16)$$

$$F^{-1}(t) = F^{-1}(t-1) + \phi(t-1)\phi^T(t-1) \quad (2.17)$$

$$\varepsilon^0(t) = y(t) - \phi^T(t)\hat{\theta}(t-1) \quad (2.18)$$

diperoleh :

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + F(t) + \phi(t-1)\varepsilon^0(t) \quad (2.19)$$

atau

$$F(t+1) = F(t) - \frac{F(t)\phi(t)\phi^T(t)F(t)}{1 + \phi^T(t)F(t)\phi(t)} \quad (2.20)$$

$$\hat{\theta}(t+1) = \hat{\theta}(t) + \frac{F(t)\phi(t)\varepsilon^0(t+1)}{1 + \phi^T(t)F(t)\phi(t)} \quad (2.21)$$

Matriks  $[\phi(t) \ \phi^T(t)]$  adalah definit positif, sehingga akan diperoleh kondisi  $F(\infty) = 0$ . Ini memberikan konsekuensi langsung terhadap sifat estimator parameter  $\hat{\theta}(t+1)$  tidak lagi konsisten setelah  $t > T_\infty$ . Dengan kata lain bahwa algoritma penguat adaptasi (2.20) dan algoritma estimator (2.21) setelah  $t > T_\infty$  tidak mungkin lagi mengikuti perubahan parameter  $\theta(t > T_\infty)$ .

Untuk mengatasi permasalahan di atas perlu dilakukan modifikasi terhadap algoritma penguat adaptasi. Suatu perbaikan dapat diperoleh dengan pemberian nilai faktor pengabai (forgetting factor)  $\alpha$  sehingga penulisan umum



penguat adaptasi menjadi sebagai berikut :

$$F^-(t) = \alpha_1(t) F^-(t-1) + \alpha_2(t) \varnothing(t-1) \varnothing^T(t-1) \quad (2.22)$$

dengan :

$$0 < \alpha_1 \leq 1 ; \quad 0 \leq \alpha_2 < 2 ; \quad F(0) > 0$$

Dengan formulasi (2.22) diperoleh algoritma rekursif penguatan adaptif sebagai berikut :

$$F(t+1) = \frac{1}{\alpha_1(t)} \left\{ F(t) - \frac{F(t) \varnothing(t) \varnothing^T(t) F(t)}{\beta(t) + \varnothing^T(t) F(t) \varnothing(t)} \right\} \quad (2.23)$$

dengan :  $\beta(t) = \frac{\alpha_1(t)}{\alpha_2(t)}$

Selanjutnya bergantung pada parameter faktor pengabai  $\alpha_1(t)$  dan  $\alpha_2(t)$ .

Untuk tipe variabel vektor pengabai, parameter  $\alpha_1(t)$  dan  $\alpha_2(t)$  dibuat sebagai berikut :

$$\alpha_1(t) = \alpha_0 \alpha_1(t-1) + 1 - \alpha_0 \quad (2.24)$$

$$0 < \alpha_0 < 1 \text{ dan } \alpha_1(t) < 1$$

Dalam praktek diambil  $\alpha_1(0) = 0,95 \div 0,99$

Struktur algoritma penguat adaptasi dengan demikian menjadi sebagai berikut :

$$F^-(t) = \alpha_1(t) F^-(t-1) + \varnothing(t-1) \varnothing^T(t-1) \quad (2.25)$$

dengan kriteria ekivalen dari estimator adalah :

$$J(t) = \sum_{i=1}^t \alpha_i^{(t-i)} (i) \{ y(i) - \hat{\theta}^T(t) \phi(i-1) \}^2 \quad (2.26)$$

Arti fisis dari algoritma di atas adalah bahwa bobot pada faktor koreksi semakin menurun asimtotik. Algoritma semacam ini dimaksudkan untuk mempercepat terjadinya konvergensi.

Estimasi pada tugas akhir ini menggunakan teknik kuadrat terkecil yang diperluas (*ELS = Extended Least Square*), yaitu sekaligus melakukan estimasi parameter model gangguan sedemikian sehingga diperoleh hasil yang tidak bias, dengan algoritma yang hampir sama dengan estimasi kuadrat terkecil, yaitu :

$$\hat{y}(t) = \hat{\theta}^T(t) \phi_e(t-1) \quad (2.27)$$

$$\hat{\theta}(t) = [ a_1 \dots a_{na} \quad b_1 \dots b_{nb} \quad c_1 \dots c_{nc} ]^T \quad (2.28)$$

$$\phi_e(t-1) = [ -y(t-1) \dots -y(t-na) \quad u(t-1-d) \dots u(t-nb-d) \\ e(t-1) \dots e(t-nc) ]^T \quad (2.29)$$

$$e(t) = y(t) - \hat{\theta}^T(t) \phi_e(t-1) \quad (2.30)$$

Selanjutnya estimator kuadrat terkecil dapat digunakan dengan menggantikan  $\phi(t)$  dengan  $\phi_e(t)$ .



### 2.3. VARIANSI MINIMUM YANG DIPERUMUM [5]

Perancangan pengendali variansi minimum yang diperumum bertujuan untuk menentukan sinyal pengendali  $u(t)$  yang diperoleh dengan meminimumkan kriteria kinerja  $J_{GMV}$  agar dicapai pengendalian tegangan dan frekuensi yang optimal.

$$\begin{aligned}
 J_{GMV} &= E \left\{ \left( \hat{y}(t+d) - r(t) \right)^2 + \lambda u^2(t) \right\} \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \left\{ \left( \hat{y}(t+d) - r(t) \right)^2 + \lambda u^2(t) \right\} \\
 &= \text{minimum}
 \end{aligned} \tag{2.31}$$

dengan :

- $\hat{y}(t+d)$  : prediksi keluaran d langkah
- $r(t)$  : sinyal acuan keluaran
- $\lambda$  : faktor pembobot sinyal kendali
- $E \{ . \}$  : ekspektasi statistik dari proses.

Jika diambil sistem pada persamaan (2.1) dan diselesaikan sebagai berikut :

$$y(t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} q^{-d} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} e(t) \tag{2.32}$$

$$y(t+d) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + \frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} e(t+d) \tag{2.33}$$

Diperlukan prediksi  $y(t+d|t)$  atau prediksi  $d$  langkah kemudian dari  $y(t)$  jika diberikan informasi hingga  $t$ . Untuk mendapatkan  $y(t+d|t)$  perhatikan identitas berikut :

$$\frac{C(q^{-1})}{A(q^{-1})} = F(q^{-1}) + q^{-d} \frac{G(q^{-1})}{A(q^{-1})} \quad (2.34)$$

dengan :

$$F(q^{-1}) = 1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{d-1} q^{-(d-1)} \quad (2.34.a)$$

$$G(q^{-1}) = g_0 + g_1 q^{-1} + g_2 q^{-2} + \dots + g_{n-1} q^{-(n-1)} \quad (2.34.b)$$

Selanjutnya persamaan (2.34) disubstitusikan ke persamaan (2.33) diperoleh :

$$y(t+d) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + F(q^{-1}) e(t+d) + \frac{G(q^{-1})}{A(q^{-1})} e(t) \quad (2.35)$$

$$\begin{aligned} F(q^{-1}) e(t+d) &= (1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{d-1} q^{-(d-1)}) e(t+d) \\ &= e(t+d) + f_1 e(t+d-1) + \dots + f_{d-1} e(t+1) \end{aligned} \quad (2.36)$$

Persamaan (2.36) adalah gangguan -gangguan yang tidak diketahui pada saat  $t$ . Dengan demikian dapat dimengerti bahwa prediksi keluaran  $d$  langkah kemudian menjadi :

$$y(t+d | t) = \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + \frac{G(q^{-1})}{A(q^{-1})} e(t) \quad (2.37)$$

$e(t)$  dapat diperoleh dari persamaan (3.1)

$$e(t) = \frac{A(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(t) + \frac{B(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(t-d) \quad (2.38)$$

sehingga



$$\begin{aligned}
 y(t+d | t) &= \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} u(t) + \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(t) - \frac{G(q^{-1})}{A(q^{-1})} \frac{B(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(t-d) \\
 \hat{y}(t+d | t) &= \frac{B(q^{-1})}{A(q^{-1})} \left[ 1 - \frac{q^{-d}}{C(q^{-1})} \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})} \right] u(t) + \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(t) \\
 y(t+d | t) &= \frac{B(q^{-1}) F(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(t) + \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(t)
 \end{aligned} \tag{2.39}$$

Dengan kesalahan prediksi adalah :

$$\begin{aligned}
 e(t+d) &= y(t+d) - \hat{y}(t+d | t) \\
 &= F(q^{-1}) e(t+d)
 \end{aligned} \tag{2.40}$$

Selanjutnya fungsi kriteria pengendali prediksi d langkah :

$$J_{\text{MSE}} = E\{[\hat{y}(t+d | t) + e(t+d) - r(t)]^2 + \lambda u^2(t)\} \tag{2.41}$$

Karena  $\varepsilon(t+d)$  adalah gangguan yang bebas terhadap komponen  $\hat{y}(t+d | t)$ , maka kriteria menjadi :

$$\begin{aligned}
 J_{\text{MSE}} &= E\{[\hat{y}(t+d | t) - r(t)]^2 + \lambda u^2(t)\} + E\{\varepsilon^2(t+d)\} \\
 J_{\text{minimum}} &= E\{\varepsilon^2(t+d)\}
 \end{aligned} \tag{2.42}$$

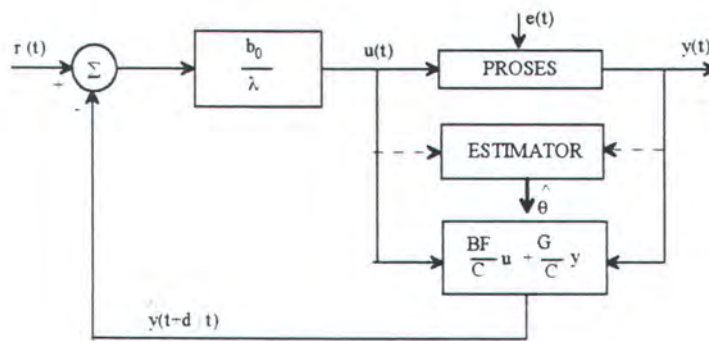
Hukum kendali  $u(t)$  diperoleh dari fungsi kriteria :

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial J(t)}{\partial u(t)} &= 0 \\
 &= 2 \{ \hat{y}(t+d | t) - r(t) \} \frac{\partial \hat{y}(t+d | t)}{\partial u(t)} + 2 \lambda u(t) \\
 \frac{\partial \hat{y}(t+d | t)}{\partial u(t)} &= \frac{\partial}{\partial u(t)} \left[ \frac{B(q^{-1}) F(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(t) \right] \\
 \frac{B(q^{-1}) F(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(t) &= b_0 u(t) + \dots u(t-1) + \dots \\
 \frac{\partial \hat{y}(t+d | t)}{\partial u(t)} &= b_0
 \end{aligned} \tag{2.43}$$

$$\frac{\partial \mathcal{J}(t)}{\partial u(t)} = 2 b_0 \{ \hat{y}(t+d|t) - r(t) \} - 2\lambda u(t) = 0$$

$$u(t) = \frac{b_0}{\lambda} \{ r(t) - \hat{y}(t+d|t) \} \quad (2.44)$$

Dari persamaan (2.39) dan (2.44) dapat dibuat diagram blok pengendali adaptif tegangan dan frekuensi pembangkit listrik seperti pada gambar (2.2). Pada proses P dengan masukan  $u(t)$  dan keluaran  $y(t)$  serta gangguan  $e(t)$  dilakukan identifikasi parameter proses akan menghasilkan menghasilkan estimasi parameter  $\hat{\theta}$  yang berisi polinomial A, B dan C. Dari persamaan identitas (2.34) akan diperoleh harga F dan G. Dengan persamaan (2.39) diperoleh prediksi d langkah  $\hat{y}(t+d|t)$  dan selanjutnya pengendali  $u(t)$  diperoleh dari persamaan (2.44).



**Gambar (2.3).** Diagram blok pengendali adaptif [5].

Sistem lingkaran tertutup diperoleh dengan substitusi persamaan (2.44) ke persamaan (2.1) :

$$y(t) = \left[ \frac{q^{-d} B(q^{-1})}{B(q^{-1}) + \lambda A(q^{-1})} \right] r(t) + \left( \frac{B(q^{-1}) F(q^{-1}) + \lambda C(q^{-1})}{B(q^{-1}) + \lambda A(q^{-1})} \right) e(t) \quad (2.45)$$

dengan :

$$\lambda_0 = \frac{\lambda}{b_0}$$

Dari persamaan (2.45) terlihat bahwa dinamika dari sistem kendali ditentukan oleh persamaan karakteristik  $(B + \lambda_0 A)$ . Dengan demikian pemilihan faktor pembobot lambda akan mempengaruhi kestabilan dari sistem.

Agar tercapai nilai keluaran yang menuju nol pada keadaan tunak untuk perubahan masukan atau gangguan diperlukan aksi kendali integral sehingga faktor pembobot dibuat sebagai berikut :

$$\lambda = \rho (1 - q^{-1}) \quad (2.46)$$

dengan :

$\rho$  = konstanta pembobot.

Untuk sistem dengan  $b_0 = 0$ , hukum kendali (2.44) di atas tidak bisa digunakan karena  $u(t) = 0$  setiap saat. Maka dibuatlah modifikasi sebagai berikut :

$$J_{GMV} = E \{ [ \hat{y}(t+d|t) - r(t) ]^2 + \lambda u^2(t-1) \} \quad (2.47)$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial u(t-1)} = 0 \quad (2.48)$$

$$\frac{\partial J(t)}{\partial u(t-1)} = 2(\hat{y}(t+d|t) - r(t)) \frac{\partial \hat{y}(t+d|t)}{\partial u(t-1)} + 2\lambda u(t-1)$$

$$\frac{\partial \hat{y}(t+d|t)}{\partial u(t-1)} = b_1$$



$$\frac{\partial \mathcal{J}(t)}{\partial u(t-1)} = 2b_1 \{y(t+d|t) - r(t)\} + 2\lambda u(t-1) \quad (2.49)$$

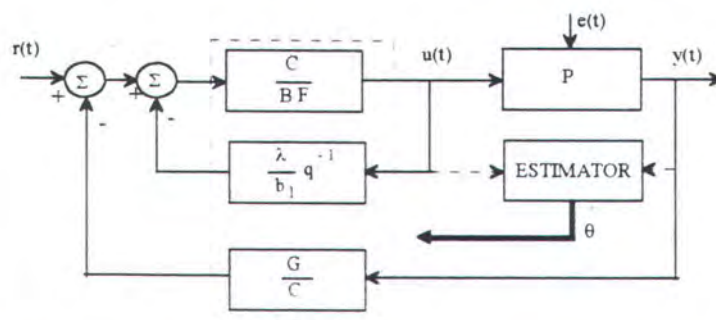
$$\frac{\partial \mathcal{J}(t)}{\partial u(t-1)} = 2b_1 \left\{ \frac{B(q^{-1}) F(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(t) + \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(t) - r(t) \right\} + 2\lambda u(t-1)$$

$$2b_1 \left\{ \frac{B(q^{-1}) F(q^{-1})}{C(q^{-1})} u(t) + \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(t) - r(t) \right\} + 2\lambda u(t-1) = 0$$

$$u(t) = \frac{C(q^{-1})}{B(q^{-1}) F(q^{-1})} \left\{ r(t) - \left[ \frac{\lambda}{b_1} u(t-1) + \frac{G(q^{-1})}{C(q^{-1})} y(t) \right] \right\} \quad (2.50)$$

Dengan  $u(t-1) = q^{-1} u(t)$ , persamaan (2.50) dapat dibuatkan diagram blok pengendali adaptif tegangan dan frekuensi pembangkit listrik (untuk  $b_0 = 0$ )

seperti pada gambar (2.3). Pengendali  $u(t)$  diperoleh dari umpan balik keluaran  $y(t)$  dan masukan yang digeser 1 langkah serta acuan keluaran  $r(t)$  dengan algoritma (2.50). Harga-harga  $b_1, B, C, F, G$  diperoleh dari estimasi parameter dan persamaan identitas.



**Gambar (2.4).** Diagram blok pengendali adaptif tegangan dan frekuensi pembangkit listrik (untuk  $b_0 = 0$ ) [5].



# **TUGAS AKHIR**

## **BAB III**

### **PEMODELAN DINAMIK LINIER SISTEM PLTU SURALAYA**



# **BAB III**

## **PEMODELAN DINAMIK LINIER**

### **SISTEM PLTU SURALAYA**

#### **3.1. MODEL MESIN SINKRON**

Dalam bab ini dituangkan model dinamik sistem tenaga listrik mesin tunggal yang meliputi : generator sinkron, sistem turbin dan pengaturannya, dan sistem eksitasi. Model mesin sinkron ini mengacu pada model mesin tunggal yang dihubungkan pada bus tak terhingga yang diperkenalkan oleh De Mello dan Concordia.

##### **3.1.1. Pemodelan Sistem Eksitasi PLTU Suralaya**

Sistem eksitasi generator yang ada pada PLTU Suralaya adalah sistem eksitasi brushless yang mengacu pada representasi sistem eksitasi tipe 1 IEEE. Pada sistem eksitasi tipe 1 ini terdapat blok regulator tegangan, regulator stabilitas dan blok eksitasi.

Input model ini adalah sinyal error tegangan terminal  $V_{err}$ . Sinyal error ini timbul karena adanya perbedaan tegangan terminal mesin dengan tegangan referensi. Pada titik penjumlahan pertama, sinyal stabilitas umpan balik regulator tegangan  $V_F$  menjadi pengurang dan sinyal stabilitas sistem tenaga  $V_S$  ditambahkan



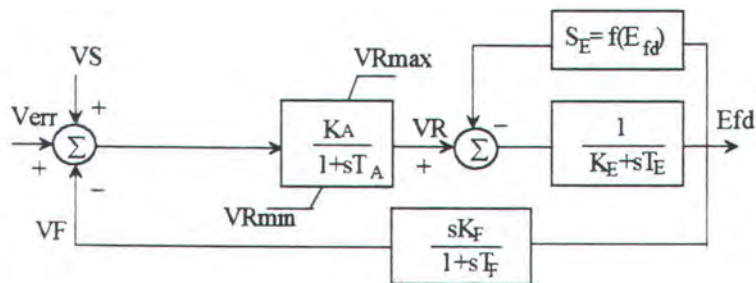
pada  $V_{err}$ . Pada keadaan mantap, kedua sinyal ini sama dengan nol. Sinyal yang dihasilkan setelah titik penjumlahan ini diperkuat dalam regulator tegangan, karena menentukan respon tegangan eksitasi dalam keadaan peralihan. Output tegangan  $V_R$  dari regulator tegangan dibatasi. Output regulator tegangan VR digunakan untuk mengontrol eksitasi, baik eksitasi penguatan bebas maupun penguatan sendiri.

$S_E$  merepresentasikan saturasi eksiter dan besarnya merupakan fungsi dari tegangan output eksiter  $E_{fd}$  ( $S_E = f(E_{fd})$ ). Pada kondisi mantap :

$$V_R - (K_E + S_E)E_{fd} = 0, E_{fd \min} \leq E_{fd} \leq E_{fd \max} \quad (3.1)$$

Pada batas atas, atau  $E_{fd} = E_{fd \max}$ .

$$V_R \max - (K_E + S_E \max)E_{fd \max} = 0 \quad (3.2)$$



**Gambar 3.1** Eksitasi Tipe 1 IEEE. [9]

Dalam simulasi kestabilan dinamik ini efek saturasi diperhitungkan karena dengan gangguan yang relatif kecil perubahan tegangan eksitasi diperkirakan sudah

Dengan  $K_{gu}$ ,  $T_{gu}$ ,  $T_{tu}$  masing- masing merupakan konstanta penguatan pengatur turbin uap, waktu tanggap pengatur turbin uap, dan waktu tanggap turbin uap.

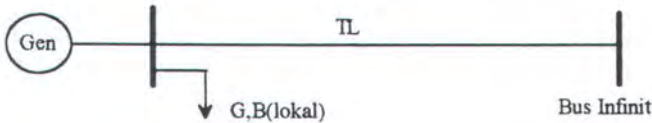
Dari gambar3.3. dapat dijabarkan menjadi :

$$\Delta \dot{T_m} = \frac{\Delta Y}{T_{\tau u}} - \frac{\Delta T_m}{T_{\tau u}} \tag{3.3}$$

$$\Delta \dot{Y} = \frac{K_{gu}\Delta U}{T_{gu}} - \frac{K_{gu}\Delta \omega}{T_{gu}R} - \frac{\Delta Y}{T_{gu}} \tag{3.4}$$

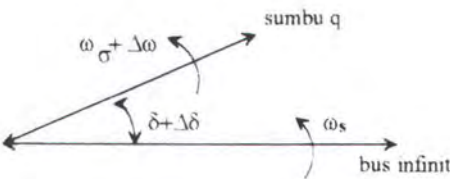
3.1.3. Persamaan Dasar Torsi Mekanik

Model mesin sinkron untuk model satu mesin terhubung ke infinit bus mengacu pada model yang diturunkan oleh De Mello dan Concordia.



Gambar 3.4: Sistem mesin tunggal terhubung dengan infinit bus [1]

Diagram phasor untuk perubahan sudut rotor yang disebabkan oleh perubahan kecepatan putaran turbin dapat digambarkan sebagai berikut :



Gambar 3.5. Phasor perubahan sudut rotor [10]

sehingga dapat diturunkan rumus :

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_s \Delta\omega \quad (3.5)$$

dengan,

$\Delta\omega$  : perubahan kecepatan rotor

$\Delta\delta$  : perubahan kedudukan rotor mesin serempak

$\omega_s$  : kecepatan sinkron



**Gambar 3.6.** Skema daya input output generator [10]

persamaan torsi mekanik dan elektrik dapat diturunkan sebagai berikut :

$$T_m - T_e = J \frac{d\omega}{dt} + d\omega \quad (3.6)$$

sedang persamaan torsi dasarnya :

$$T_b = \frac{F_b}{\omega_b} ; \quad \omega_b = \omega_s \quad (3.7)$$

$$\frac{T_m}{T_r} - \frac{T_e}{T_r} = J \frac{\omega_s}{T_b} \frac{d\omega}{dt} + \frac{d\omega_s}{T_r} \frac{\omega}{\omega_s}$$

$$T_m - T_e = M \frac{d\omega}{dt} + D\omega \quad (3.8)$$

dengan

$$M = J \frac{d\omega}{P_r} ; \quad D = \frac{d\omega_s}{P_r} \quad (3.9)$$

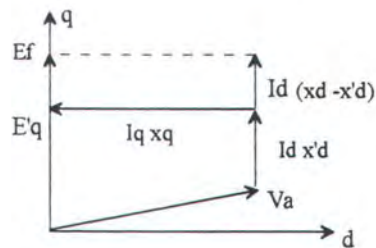
Setelah dilinierisasi,

$$\Delta T_m - \Delta T_e = M \frac{d\Delta\omega}{dt} + D\Delta\omega \quad (3.10)$$



### 3.1.4. Persamaan Dasar Medan

Agar mudah memahami penurunan persamaan medan, terlebih dahulu diperlihatkan gambar diagram phasor arus dan tegangan mesin sinkron sebagai berikut :



**Gambar 3.7.** Diagram phasor arus dan tegangan mesin sinkron [10]

Dari diagram phasor arus dan tegangan mesin sinkron diatas diperoleh :

$$E'_q = E_f - I_d (x_d - x'_d) \quad (3.11)$$

$$E_f = \omega L_{af} \frac{i_f}{\sqrt{2}} = \lambda_{af} I_f \quad (3.12)$$

$$x_d = x_d - \frac{3x_{af}^2}{2x_f}; x_d - x'_d = \frac{3x_{af}^2}{x_f} \quad (3.13)$$

Dari ketiga persamaan diatas, diperoleh :

$$E'_q = x_{af} I_f - \frac{3x_{af}^2}{2x_f} I_d \quad (3.14)$$

$$E'_q = \frac{x_{af}}{x_f} \left( x_f I_f - \frac{3}{2} x_{af} I_d \right) \quad (3.15)$$

Untuk menyelesaikan persamaan di atas, harus diketahui persamaan fluksi medan, yaitu sebagai berikut :

$$\Psi_f = L_{ff} i_f - \frac{3}{2} L_{af} i_f \quad (3.16)$$

$$\frac{\omega}{\sqrt{2}} \Psi_f = x_f I_f - \frac{3}{2} x_{af} I_d \quad (3.17)$$

dengan memasukkan persamaan diatas ke dalam persamaan  $E'_q$ , akan diperoleh :

$$E'_q = \frac{X_{af}}{X_f} \frac{\omega \psi_f}{\sqrt{2}} \quad (3.18)$$

atau persamaan medannya adalah :

$$V_f = \frac{d\psi_f}{dt} + X_f i_f \quad (3.19)$$

$$V_f = \frac{\sqrt{2} X_f}{\omega X_{af}} \frac{dE'_q}{dt} + X_f i_f \quad (3.20)$$

maka

$$\frac{X_{af}}{\sqrt{2} X_f} V_f = \frac{X_f}{\omega X_f} \dot{E}'_q + \frac{X_{af}}{\sqrt{2}} i_f \quad (3.21)$$

dengan persamaan ekivalen dinamik tegangan eksitasi adalah

$$\frac{X_{af}}{\sqrt{2} X_f} V_f = E_{fd} \quad (3.22)$$

Dan persamaan konstanta waktu peralihan medan eksitasi (field time constant)

adalah :

$$\frac{X_f}{\omega X_f} = T_{dc} \quad (3.23)$$

dengan,

$$\frac{X_{af}}{\sqrt{2}} i_f = E_f \quad (3.24)$$

Dengan demikian persamaan medan dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} E_{fd} &= T_{dc} \dot{E}'_q + E_f \\ E_{fd} &= T_{dc} \dot{E}'_q + E'_q + (x_d - x'_d) I_d \end{aligned} \quad (3.25)$$

Setelah dilinierisasi, diperoleh

$$\Delta E_{fd} = T_{dc} \dot{\Delta E}'_q + \Delta E'_q + (x_d - x'_d) \Delta I_d \quad (3.26)$$

### 3.1.5. Persamaan Tegangan Terminal

Tegangan terminal pada bus dalam koordinat d - q adalah sebagai berikut :

$$\bar{V}_t = \bar{V}_d + \bar{V}_q \quad (3.27)$$

$$V_t^2 = V_d^2 + V_q^2 \quad (3.28)$$

dengan melinierisasi persamaan tegangan terminal ini, diperoleh :

$$V_t \Delta V_t = V_d \Delta V_d + V_q \Delta V_q \quad (3.29)$$

$$V_d = x_q I_q \quad (3.31)$$

$$\Delta V_d = x_q \Delta I_q \quad (3.32)$$

$$V_q = E_q - x_d I_d \quad (3.33)$$

$$V_q = E'_q - x'_d I_d \quad (3.34)$$

$$\Delta V_q = \Delta E'_q - x'_d \Delta I_d \quad (3.35)$$

maka persamaan tegangan terminal menjadi :

$$V_t \Delta V_t = V_d x_q \Delta I_q + V_q \Delta E'_q - V_q x'_d \Delta I_d \quad (3.36)$$

### 3.1.6. Persamaan Daya Elektrik

Persamaan daya elektrik dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$T_e = P_e \quad (3.37)$$

$$P_e = \text{Reil} (VI^*)$$

$$P_e = \text{Reil} [(V_d + jV_q) (I_d - jI_q)]$$





$$P_e = V_d I_q + V_q I_d \quad (3.38)$$

dengan,

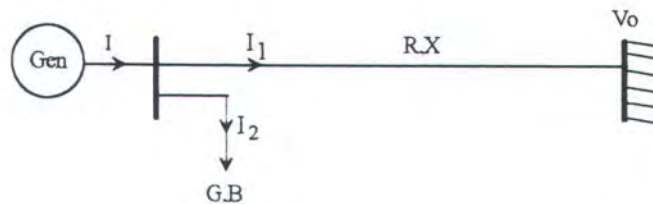
$$\Delta T_e = \Delta P_e = V_d \Delta I_d + I_d \Delta V_d + V_q \Delta I_q + I_q \Delta V_q \quad (3.39)$$

sehingga diperoleh persamaan daya elektrik

$$\Delta P_e = (V_d - x'_d I_q) \Delta I_d + (V_q + x_q I_d) \Delta I_q + I_q \Delta E'_q \quad (3.40)$$

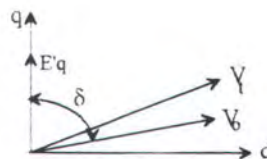
### 3.1.7. Persamaan Arus

Di bawah ini adalah diagram segaris dari sistem mesin tunggal terhubung dengan bus tak terhingga dan beban lokal :



**Gambar 3.8.a.** Rangkain sistem mesin tunggal [10]

Sedangkan diagram phasornya dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



**Gambar 3.8.b.** Diagram phasor mesin tunggal [10]

persamaan arus sistem mesin tunggal dapat diuraikan sebagai berikut :

$$I = I_1 + I_2 \quad (3.41)$$

$$I_1 = \frac{(V_1 - V_2)}{Z} \quad (3.42)$$

$$I_2 = Y V_2 \quad (3.43)$$

$$I = \left(\frac{1}{Z} + YV_2\right) - \left(\frac{1}{Z}V_1\right) \quad (3.44)$$

$$ZI = (1 + YZ)V_2 - V_1 \quad (3.45)$$

dengan,

$$Z = R + jX \quad (3.46)$$

$$Y = G + jB \quad (3.47)$$

$$I = I_d + jI_q \quad (3.48)$$

$$1 + YZ = C_1 + jC_2 \quad (3.49)$$

$$V_1 = V_d + jV_q \quad (3.50)$$

$$V_0 = V_c (\sin \delta + j \cos \delta) \quad (3.51)$$

dengan memasukkan persamaan-persamaan di atas ke dalam persamaan arus, akan diperoleh :

$$\begin{aligned} (R + jX)(I_d + jI_q) &= (C_1 + jC_2)(V_d + jV_q) \\ &- V_c (\sin \delta + j \cos \delta) \end{aligned} \quad (3.52)$$

maka komponen riil :

$$RI_d - XI_q = C_1V_d - C_2V_q - V_c \sin \delta \quad (3.53)$$

komponen imajiner :

$$XI_d + RI_q = C_1V_q + C_2V_d - V_c \cos \delta \quad (3.54)$$

Dalam bentuk persamaan matriks dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} R & -X \\ X & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & -C_2 \\ C_1 & C_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} - V_0 \begin{bmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

dengan,

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & X_q \\ -X_d' & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E_q' \end{bmatrix} \quad (3.56)$$

maka persamaan matriks arus menjadi :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} E_q' - \frac{V_0}{W} \begin{bmatrix} R_2 & X_2 \\ -X_1 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \delta \\ \cos \delta \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

dengan,

$$R_1 = R - C_2 X_d' \quad (3.58)$$

$$R_2 = R - C_2 X_q \quad (3.59)$$

$$X_1 = X + C_1 X_d' \quad (3.60)$$

$$X_2 = X + C_1 X_q \quad (3.61)$$

$$Y_1 = \frac{(X_2 C_1 - R_2 C_2)}{W} \quad (3.62)$$

$$Y_2 = \frac{(X_1 C_2 + R_1 C_1)}{W} \quad (3.63)$$

$$W = R_1 R_2 + X_1 X_2 \quad (3.64)$$

Persamaan matriks arus, setelah disederhanakan dan dilinierisasi :

$$\begin{bmatrix} \Delta I_d \\ \Delta I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{bmatrix} \Delta E_q' + \begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} \Delta \delta \quad (3.65)$$

dengan,

$$\begin{bmatrix} F_d \\ F_q \end{bmatrix} = \frac{-V_0}{W} \begin{bmatrix} R_2 & X_2 \\ -X_1 & R_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \delta \\ -\sin \delta \end{bmatrix} \quad (3.66)$$



Persamaan arus  $\Delta I_d$ ,  $\Delta I_q$  di atas sangat dibutuhkan untuk menyelesaikan persamaan- dasar 3.26 ,3.36 dan 3.40. Oleh karena itu persamaan arus tersebut merupakan satu kesatuan dengan persamaan- persamaan dasar yang telah dijelaskan sebelumnya.

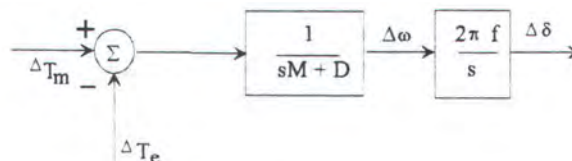
### 3.1.8. Pemodelan Persamaan Elektromekanik

Dengan menggunakan transformasi Laplace pada persamaan- persamaan dasar 3.5 dan 3.10 diperoleh :

$$\Delta \delta = \frac{2\pi f}{s} \Delta \omega \quad (3.67)$$

$$\Delta T_m - \Delta T_e = (sM + D) \Delta \omega \quad (3.68)$$

diagram blok loop mekanik mesin sinkron dapat digambarkan seperti dibawah ini



**Gambar 3.9.** Diagram blok loop mekanik mesin [10]

### 3.1.9. Pemodelan Persamaan Tegangan Terminal

Dengan memasukkan persamaan arus ke dalam persamaan dasar 3.9, akan diperoleh :

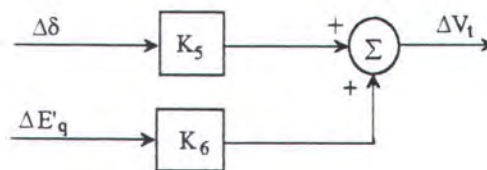
$$\Delta V_t = K_\delta \Delta \delta + K_E \Delta E'_d \quad (3.69)$$

dengan,

$$K_5 = \frac{(V_\sigma X_q F_q - V_q X'_d F_\sigma)}{V_T} \quad (3.70)$$

$$K_6 = \frac{V_\sigma X_q Y_2 + V_q (1 - X'_d Y_1)}{V_t} \quad (3.71)$$

sehingga diagram bloknya dapat digambarkan sebagai berikut:



**Gambar 3.10.** Diagram blok tegangan terminal [10]

### 3.1.10. Pemodelan Persamaan Daya Elektrik

Dengan memasukkan persamaan arus ke dalam persamaan dasar 3.40 akan diperoleh :

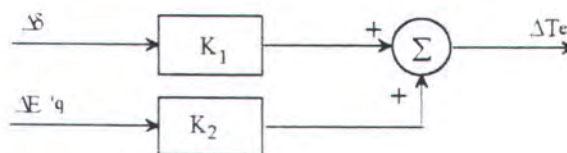
$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (3.72)$$

dengan,

$$K_1 = (x_q - x'_d) I_q F_d + [E'_q + (x_q - x'_d) I_d] F_q \quad (3.73)$$

$$K_2 = [1 + (x_q - x'_d) Y_1] I_q + [E'_q + (x_q - x'_d) I_d] Y_2 \quad (3.74)$$

Blok diagram persamaan torsi elektrik dapat digambarkan seperti di bawah ini :



**Gambar 3.11.** Diagram blok torsi mekanik [10]

### 3.1.11. Pemodelan Persamaan Medan

Dengan menggunakan transformasi Laplace, bentuk persamaan medan akan menjadi :

$$\begin{aligned}\Delta E_{fd} &= T'_{do} s \Delta E'_q + \Delta E'_q + (x_d - x'_d) \Delta I_d \\ \Delta E_{fd} &= (1 + s T'_{do}) \Delta E'_q + (x_d - x'_d) \Delta I_d\end{aligned}\quad (3.75)$$

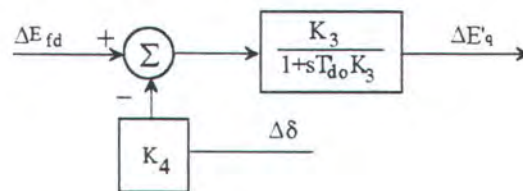
Dengan menggantikan  $\Delta I_d$  dan mendefinisikan :

$$K_3 \approx \frac{1}{1 + (x_d - x'_d) Y_1} T'_{do} \quad (3.76)$$

diperoleh persamaan medan :

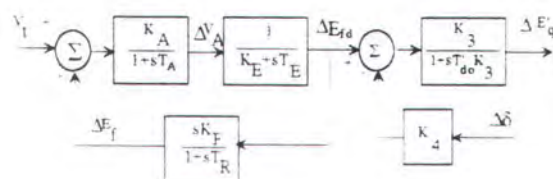
$$\Delta E'_q = \frac{K_3}{1 + s T'_{do} K_3} (\Delta E_{fd} - K_4 \Delta \delta) \quad (3.77)$$

dan blok diagramnya dapat digambarkan sebagai berikut



**Gambar 3.12.** Diagram blok tegangan peralihan mesin sinkron [10]

$\Delta E_{fd}$  adalah keluaran dari sistem eksitasi. Dari gambar 3.12 dapat digambarkan blok diagram untuk regulator tegangan dan sistem eksitasi sebagai berikut :



**Gambar 3.13.** Diagram blok regulator tegangan dan sistem eksitasi





$\Delta T_m$  sebagai perubahan torsi mekanik,  $\Delta \delta$  sebagai perubahan sudut rotor,  $\Delta \omega$  sebagai perubahan kecepatan sudut,  $\Delta E'_q$  sebagai perubahan tegangan generator,  $\Delta E_{fd}$  sebagai perubahan tegangan medan,  $\Delta E_f$  sebagai perubahan tegangan  $\Delta E'_q$  ke arah eksitasi setelah difilter,  $\Delta E_r$  sebagai perubahan tegangan ke arah eksitasi setelah dikuatkan. Variabel masukan untuk mesin terdiri dari dua masukan yaitu sinyal masukan  $\Delta U_1$  diumpankan ke sisi turbin dan sinyal masukan  $\Delta U_2$  diumpankan ke sisi eksitasi. Variabel keluaran berupa  $\Delta Y$ ,  $\Delta T_m$ ,  $\Delta P_e$  (perubahan daya listrik),  $\Delta \omega$ ,  $\Delta V_t$  (perubahan tegangan terminal),  $\Delta E_{fd}$ ,  $\Delta E_f$  dan  $\Delta V_A$ .

### 3.2. PERSAMAAN KEADAAN DAN PERSAMAAN OUTPUT

Bentuk umum persamaan matrik keadaan sistem dapat ditulis sebagai berikut :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Delta Y} \\ \dot{\Delta T_m} \\ \dot{\Delta \delta} \\ \dot{\Delta \omega} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \\ \dot{\Delta E_f} \\ \dot{\Delta V_A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{18} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{81} & \dots & \dots & a_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_m \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta E_f \\ \Delta V_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ \dots & \dots \\ b_{81} & b_{82} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix}$$

### 3.2.1. Komponen Matriks A

Persamaan keadaan untuk mencari nilai matriks A (matriks variabel keadaan) dapat diturunkan sebagai berikut (dengan asumsi  $\Delta U = 0$ ) :

$$1). \quad \Delta Y = -\frac{1}{R} \Delta \omega \frac{K_{gu}}{1 + sT_{gu}} = \frac{-K_{gu}}{R + R T_{gu} s} \Delta \omega \quad (3.78)$$

$$\Delta Y R + \Delta Y s R T_{gu} = -K_{gu} \Delta \omega$$

$$\dot{\Delta Y} R T_{gu} + \Delta Y R = -K_{gu} \Delta \omega.$$

$$\dot{\Delta Y} = \frac{-1}{T_{gu}} \Delta Y + \frac{(-K_{gu})}{R T_{gu}} \Delta \omega \quad (3.79)$$

$$2). \quad \Delta T_m = \frac{1}{1 + sT_{tu}} \Delta Y. \quad (3.80)$$

$$\Delta T_m (1 + sT_{tu}) = \Delta Y$$

$$\Delta T_m + s\Delta T_m T_{tu} = \Delta Y$$

$$\dot{\Delta T_m} = \frac{1}{T_{tu}} \Delta Y - \frac{1}{T_{tu}} \Delta T_m \quad (3.81)$$

$$3). \quad \Delta \delta = \Delta \omega \frac{\omega_0}{s} \quad (3.82)$$

$$\Delta \delta s = \omega_0 \Delta \omega$$

$$\dot{\Delta \delta} = \omega_0 \Delta \omega \quad (3.83)$$

$$4). \quad \Delta \omega = (\Delta T_m - \Delta T_e) \frac{1}{sM + D} \quad (3.84)$$

$$\Delta \omega = (-K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q + \Delta T_m) \frac{1}{sM + D}$$

$$\Delta \omega s M + \Delta \omega D = -K_1 \Delta \delta - K_2 \Delta E'_q + \Delta T_m$$

$$\dot{\Delta \omega} = \frac{1}{M} \Delta T_m - \frac{K_1}{M} \Delta \delta - \frac{D}{M} \Delta \omega - \frac{K_2}{M} \Delta E'_q \quad (3.85)$$

$$5). \quad \Delta E'_q = (-K_4 \Delta \delta + \Delta E'_{f2}) \frac{K_3}{1 + sT'_{d0} K_3} \quad (3.86)$$

$$\Delta E'_q (1 + sT'_{d0} K_3) = -K_4 K_3 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_{f2}$$

$$\Delta E'_q + \Delta E'_q s T'_{d0} K_3 = -K_4 K_3 \Delta \delta + K_3 \Delta E'_{f2}$$

$$\dot{\Delta E'_q} = -\frac{K_4}{T'_{d0}} \Delta \delta + \frac{1}{T'_{d0}} \Delta E'_{f2} - \frac{1}{K_3 T'_{d0}} \Delta E'_q \quad (3.87)$$





$$6) . \quad \Delta E_{fd} = \frac{1}{K_E + sT_E} \Delta V_A \quad (3.88)$$

$$\Delta E_{fd} (K_E + sT_E) = \Delta V_A$$

$$\Delta E_{fd} K_E + \Delta E_{fd} s T_E = \Delta V_A$$

$$\dot{\Delta E_{fd}} = \frac{1}{T_E} \Delta V_A - \frac{K_E}{T_E} \Delta E_{fd} \quad (3.89)$$

$$7) . \quad \Delta E_f = \Delta E_{fd} \frac{sK_F}{1 + sT_F} \quad (3.90)$$

$$\Delta E_f + \Delta E_f s T_F = \Delta E_{fd} s K_F$$

$$\Delta E_f s T_F = -\Delta E_f + \left( \frac{1}{T_E} \Delta V_A - \frac{K_E}{T_E} \Delta E_{fd} \right) K_F$$

$$\dot{\Delta E_f} = \frac{K_E K_F}{T_E T_F} \Delta E_{fd} - \frac{1}{T_F} \Delta E_f + \frac{K_F}{T_E T_F} \Delta V_A \quad (3.91)$$

$$8) \quad \Delta V_A = (\Delta V_t - \Delta E_f) \frac{K_A}{1 + sT_A} \quad (3.92)$$

$$\Delta V_A = (K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q - \Delta E_f) \frac{K_A}{1 + sT_A}$$

$$\Delta V_A + \Delta V_A s T_A = K_5 K_A \Delta \delta + K_6 K_A \Delta E'_q - \Delta E_f K_A$$

$$\dot{\Delta V_A} = \frac{K_5 K_A}{T_A} \Delta \delta + \frac{K_6 K_A}{T_A} \Delta E'_q - \frac{K_A}{T_A} \Delta E_f - \frac{-1}{T_A} \Delta V_A \quad (3.93)$$

Dari persamaan 3.78 sampai 3.93 di atas, komponen matriks variabel keadaan [ A ] dapat dituliskan seperti di bawah ini, dimana matriks yang tidak tercantum berharga nol.

$$a(1, 1) = \frac{-1}{T_{gu}} ; a(1, 4) = \frac{-K_{gu}}{R T_{gu}} ; a(2, 1) = \frac{1}{T_{1u}} ; a(2, 2) = \frac{1}{T_{1u}} ;$$

$$a(3, 4) = \omega_0 ; a(4, 2) = \frac{1}{M} ; a(4, 3) = \frac{-K_1}{M} ; a(4, 4) = \frac{-D}{M} ;$$

$$a(4, 5) = \frac{-K_2}{M} ; a(5, 3) = \frac{-K_3}{T'_{x0}} ; a(5, 5) = \frac{-1}{K_3 T'_{x0}} ; a(5, 6) = \frac{1}{T'_{x0}} ;$$

$$a(6, 6) = \frac{-K_E}{T_E} ; a(6, 8) = \frac{1}{T_F} ; a(7, 6) = \frac{-K_E K_F}{T_E T_F} ; a(7, 7) = \frac{-1}{T_F} ;$$

$$a(7, 8) = \frac{K_F}{T_E T_F} ; a(8, 3) = \frac{K_3 K_2}{T_1} ; a(8, 5) = \frac{K_3 K_2}{T_1} ; a(8, 7) = \frac{-K_2}{T_1} ;$$

$$a(8, 8) = \frac{-1}{T_1}$$

Dalam bentuk matrik :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{T_{gu}} & 0 & 0 & \frac{-K_{gu}}{T_{gu}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{T_{gu}} & \frac{1}{T_{gu}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} & \frac{-K_1}{M} & \frac{-\omega_0}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-K_4}{T_{dc}} & 0 & \frac{-1}{K_3 T_{dc}} & \frac{1}{T_{dc}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E}{T_E} & 0 & \frac{1}{T_E} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E}{T_F} \frac{K_F}{T_E} & \frac{-1}{T_F} & \frac{K_E}{T_F} \frac{K_E}{T_E} \\ 0 & 0 & \frac{K_5 K_A}{T_A} & 0 & \frac{K_6 K_A}{T_A} & 0 & \frac{-K_A}{T_A} & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix}$$

### 3.2.2. Komponen Matriks B

Untuk mencari matriks masukan yaitu dengan mencari persamaan keadaan, dengan menambahkan nilai  $\Delta U$ , sehingga kita akan mendapatkan persamaan keadaan yang terdiri dari variabel keadaan yang sama dengan persamaan keadaan komponen matriks A ditambah dengan variabel kontrol (masukan). Konstanta variabel kontrol inilah yang kita buat matriks masukannya. Persamaan keadaan untuk mencari nilai matriks B (matriks variabel keadaan) dapat diturunkan sebagai berikut dengan mengikut sertakan variabel  $\Delta U$ .

$$1). \Delta Y = \frac{K_{gu}}{1 + sT_{gu}} \left( \Delta U_1 - \frac{\Delta \omega}{R} \right) \quad (3.94)$$

$$\Delta Y + s\Delta Y T_{gu} = K_{gu} \Delta U_1 - \frac{K_{gu}}{R} \Delta \omega$$

$$\Delta Y^* = \frac{K_{gu}}{T_{gu}} \Delta U_1 - \frac{K_{gu}}{T_{gu}R} \Delta \omega - \frac{1}{T_{gu}} \Delta Y \quad (3.95)$$





### 3.2.3. Komponen Matriks C

Pada variabel keluaran, variabel- variabel sudut rotor dan tegangan peralihan diganti dengan variabel daya listrik dan tegangan terminal generator, karena variabel tersebut sulit untuk diukur. Persamaan keadaan untuk mencari nilai matriks C dapat diturunkan sebagai berikut :

$$1). \Delta Y = \Delta Y \quad (3.98)$$

$$2). \Delta T_m = \Delta T_m \quad (3.99)$$

$$3). \Delta P_e = \Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (3.100)$$

$$4). \Delta \omega = \Delta \omega \quad (3.101)$$

$$5). \Delta V_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (3.102)$$

$$6). \Delta E_{fd} = \Delta E_{fd} \quad (3.103)$$

$$7). \Delta E_f = \Delta E_f \quad (3.104)$$

$$8). \Delta V_R = \Delta V_R \quad (3.105)$$

Bentuk umum persamaan matriks pengukuran [9] :

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_m \\ \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta V_t \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta E_f \\ \Delta V_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & \dots & \dots & c_{18} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ c_{81} & \dots & \dots & c_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_m \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta E_f \\ \Delta V_R \end{bmatrix}$$

sehingga komponen matriks C dapat dituliskan seperti dibawah ini, dimana matriks yang tidak tercantum berharga nol

$$c(1, 1) = 1; \quad c(2, 2) = 1; \quad c(3, 3) = K_1; \quad c(3, 5) = K_2; \quad c(4, 4) = 1;$$

$$c(5, 3) = K_5 ; c(5, 5) = K_6 ; c(6, 6) = 1 ; c(7, 7) = 1 ; c(8, 8) = 1 .$$

dalam bentuk matriks :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_1 & 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_5 & 0 & K_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



# **TUGAS AKHIR**

## **BAB IV**

### **SIMULASI DAN ANALISIS**



## **BAB IV**

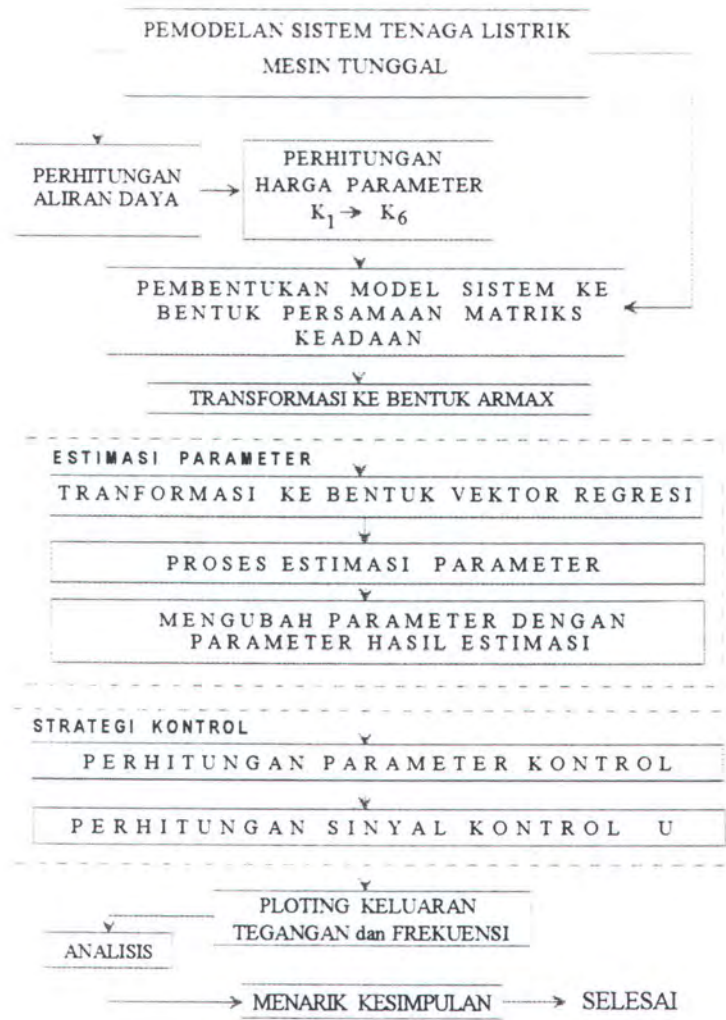
### **SIMULASI DAN ANALISIS**

#### **4.1. ALGORITMA**

Untuk mengetahui bagaimana hasil dari penerapan pengendali adaptif swatata pada sistem tenaga listrik di PLTU Suralaya perlu dilakukan simulasi. Dengan simulasi ini dapat diketahui respon frekuensi maupun tegangan setelah diterapkan kendali adaptif swatata dalam keadaan beban tenaga listrik berubah. Selain respon frekuensi dan tegangan ditampilkan pula bagaimana bentuk sinyal pengendalinya.

Tahap pertama dilakukan pemodelan sistem tenaga listrik mesin tunggal (diambil mesin unit I PLTU Suralaya) yang terhubung dengan bus infinit (diambil bus di Gandul, Jawa Barat). Tahap kedua adalah mencari data yang dibagi menjadi dua, yaitu : data yang dipergunakan untuk menghitung parameter mesin dan data yang dipergunakan untuk menghitung aliran daya. Tahap ketiga dilakukan perhitungan aliran daya dan perhitungan parameter mesin tunggal. Tahap ke empat adalah pembentukan persamaan matriks keadaan. Tahap kelima adalah penerapan pengendali adaptif swatata. Pada penerapan adaptif swatata dibentuk persamaan masukan-keluaran dalam bentuk ARMAX dan estimatornya menggunakan metode extended least square secara rekursif. Strategi kontrol yang digunakan adalah minimum variansi yang diperumum.

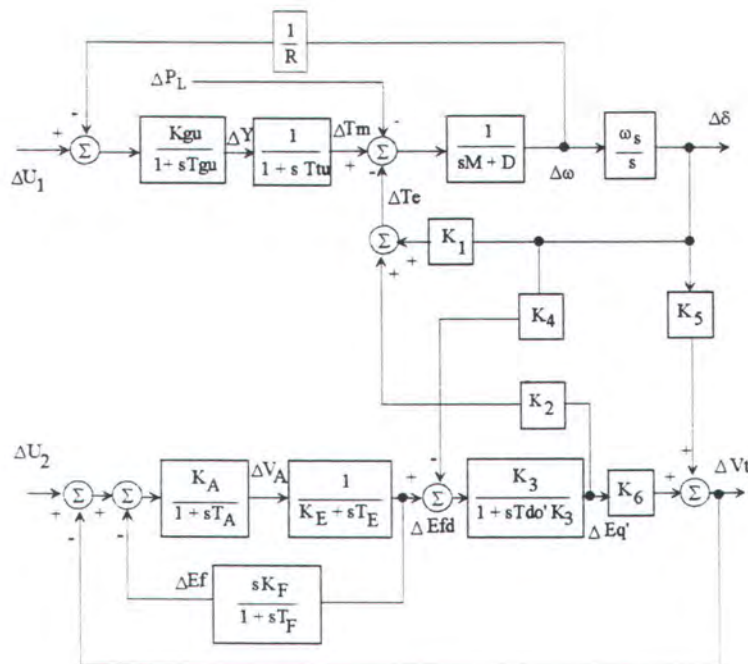
Secara global tahap-tahap penelitian dapat dilihat pada gambar dibawah ini :



Gambar 4.1. Algoritma Penelitian

#### 4.1.1. Penerapan Perubahan Beban $\Delta P_L$

Pada proses simulasi diperlukan adanya gangguan berupa perubahan beban ( $\Delta P_L$ ), sehingga dilakukan sedikit penyesuaian pada model mesin tunggal pada gambar 3.14. Hasil penyesuaian sehubungan adanya gangguan berupa  $\Delta P_L$  dapat dilihat pada gambar 4.2.



**Gambar 4.2.** Diagram blok model mesin tunggal keseluruhan disertai gangguan

Adanya penyesuaian pada diagram blok mesin tunggal seperti gambar 4.2. erakibat pada penyesuaian persamaan matriks keadaan. Dalam hal ini yang merasakan secara langsung adanya  $\Delta P_L$  adalah  $\Delta\omega$ , sehingga diperoleh persamaan yang baru sebagai berikut



$$\Delta\omega = (\Delta T_m - \Delta T_e - \Delta P_L) \frac{1}{sM + D} \quad (4.1)$$

$$\Delta\omega = (-K_1 \Delta\delta - K_2 \Delta E'_q + \Delta T_m - \Delta P_L) \frac{1}{sM + D} \quad (4.2)$$

$$\dot{\Delta\omega} = \frac{1}{M} \Delta T_m - \frac{K_2}{M} \Delta\delta - \frac{D}{M} \Delta\omega - \frac{K_2}{M} \Delta E'_q - \frac{1}{M} \Delta P_L \quad (4.3)$$

Persamaan matriks keadaan berubah menjadi :

$$\dot{x} = A x(t) + B u(t) + E w(t) \quad (4.4)$$

dengan

$E$  : matriks variabel gangguan

$w(t)$  : variabel gangguan

persamaan dalam bentuk matriks :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\Delta Y} \\ \dot{\Delta T_m} \\ \dot{\Delta\delta} \\ \dot{\Delta\omega} \\ \dot{\Delta E'_q} \\ \dot{\Delta E_{fd}} \\ \dot{\Delta E_f} \\ \dot{\Delta V_A} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{18} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{81} & \dots & \dots & a_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_m \\ \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta E_f \\ \Delta V_A \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ \dots & \dots \\ b_{81} & b_{82} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \Delta U_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{11} \\ \dots \\ \dots \\ e_{81} \end{bmatrix} [\Delta P_L] \quad (4.5)$$

Harga matriks A :

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{T_{gu}} & 0 & 0 & \frac{-K_{gu}}{E T_{gu}} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-1}{T_{gu}} & \frac{-1}{T_{gu}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \omega_0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{M} & \frac{-K_3}{M} & \frac{-1}{M} & \frac{-K_2}{M} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-K_4}{T_{ao}} & 0 & \frac{-1}{K_3 T_{ao}} & \frac{1}{T_{ao}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E}{T_E} & 0 & \frac{1}{T_E} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{-K_E}{T_F} \frac{K_F}{T_E} & \frac{-1}{T_F} & \frac{K_E}{T_F T_E} \\ 0 & 0 & \frac{K_5 K_A}{T_A} & 0 & \frac{K_6 K_A}{T_A} & 0 & \frac{-K_A}{T_A} & \frac{-1}{T_A} \end{bmatrix}$$

Harga matriks B :

$$B = \begin{bmatrix} \frac{K_{gu}}{T_{gu}} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}$$

Harga matriks E :

$$E = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{M} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Persamaan matriks pengukuran :

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ Y_3 \\ Y_4 \\ Y_5 \\ Y_6 \\ Y_7 \\ Y_8 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_n \\ \Delta P_e \\ \Delta \omega \\ \Delta V_t \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta E_f \\ \Delta V_E \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & \dots & \dots & C_{18} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ C_{81} & \dots & \dots & C_{88} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Y \\ \Delta T_n \\ \Delta \delta \\ \Delta \omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \\ \Delta E_f \\ \Delta V_E \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Harga matriks C :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_1 & 0 & K_2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_5 & 0 & K_6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Dari delapan variabel pengukuran di atas yang dilakukan analisis perubahan frekuensi ( $\Delta\omega$ ) dan perubahan tegangan terminal ( $\Delta V_t$ ).



## 4.2. SIMULASI

Simulasi pengendalian adaptif swatara dilakukan dengan bantuan paket program *PC-MATLAB*. Simulasi dibagi dalam prosedur-prosedur sebagai berikut :

### 1. Prosedur Inisialisasi

#### - *Inisialisasi Parameter Sistem*

Prosedur ini menginisialisasi harga parameter-parameter sistem dalam bentuk parameter fungsi alih. Data ini diperoleh dengan mengubah model persamaan keadaan ke dalam model masukan keluaran dengan menggunakan paket program *PC-MATLAB*.

#### - *Inisialisasi Parameter Estimator*

Prosedur ini menentukan harga awal parameter estimator terdiri dari :

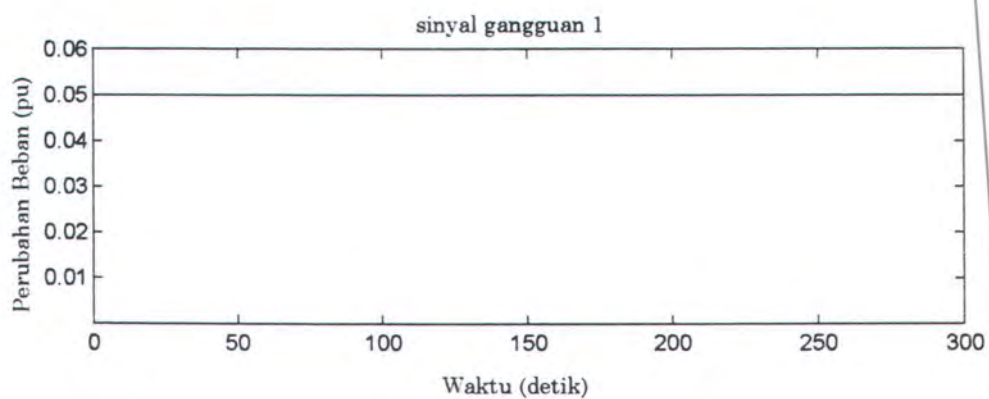
- a. Vektor parameter :  $\theta$  (theta)
- b. Vektor regresi :  $\Phi$  (fi)
- c. Diagonal matriks kovarian : diag F
- d. Orde polinomial :  $n_a, n_b, n_c$
- e. Faktor pengabai yang berubah (*variable forgetting factor*) :  $\alpha$  (alpha)

#### - *Inisialisasi Parameter Pengatur*

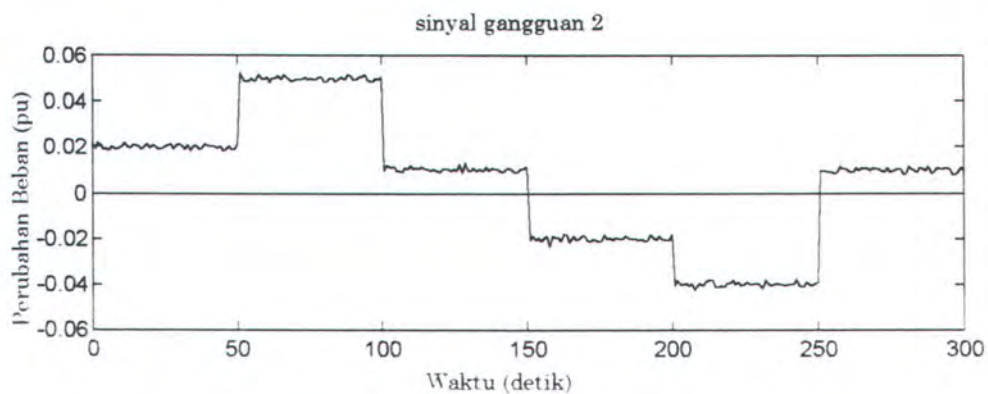
Karena menggunakan strategi kontrol variansi minimum yang diperumum maka perlu ditentukan harga konstanta pembobot  $\rho$  (rho).

## 2. Prosedur sinyal masukan

Prosedur ini menggunakan sinyal masukan gangguan berupa perubahan beban berbentuk sinyal unit step seperti pada gambar 4.3 dan sinyal unit step beramplitudo dengan sinyal acak seperti pada gambar 4.4.



**Gambar 4.3.** Sinyal gangguan 1, unit step ( $\Delta P_L = 0.05 \text{ pu}$ )



**Gambar 4.4.** Sinyal gangguan 2, unit step beramplitudo  
( $\Delta P_L = u(t) + 0.001e(t) \text{ pu}$ )

### **3. Prosedur perhitungan keluaran sistem**

Prosedur ini menghitung sinyal keluaran dalam bentuk persamaan fungsi alih dengan menggunakan vektor regresi estimator.

### **4. Prosedur estimasi parameter sistem**

Prosedur ini menentukan nilai pendekatan parameter sistem menggunakan algoritma estimasi parameter metode Extended Least Square.

### **5. Prosedur perhitungan parameter pengatur**

Prosedur ini menghitung parameter pengatur menggunakan persamaan (2.34, 2.34.a, 2.34.b) berdasarkan nilai parameter hasil estimasi pada langkah ke empat.

### **6. Prosedur perhitungan sinyal pengatur**

Prosedur ini menghitung keluaran sinyal pengatur menggunakan persamaan (2.50) dan parameter pengatur yang diperoleh dari langkah ke lima.

### **7. Prosedur memperbaharui parameter sistem**

Prosedur ini melakukan pembaharuan parameter sistem akibat dari perubahan parameter estimator dan sinyal pengendali.

### **8. Prosedur tampil hasil**

Prosedur ini menampilkan hasil simulasi berupa grafik sinyal keluaran frekuensi dan tegangan.



### 4.3. DATA

#### 4.3.1. Data Parameter Generator

Tabel 4.1. *Data Parameter Genetator Unit I*

<b>DATA PARAMETER GENERATOR DAN TURBIN UNIT I</b>	
P Base/KV Base	400 MVA/ 500 KV
Konstanta Inertia turbin (M)	6.9
Reaktansi sb. direct (xd)	1.7668
Reaktansi transien.sb. direct (xd')	0.245
Reaktansi sb. quadratur (xq)	1.64
Reaktansi Trans.sb. quadr. (xq')	1.0104
Konst. waktu transien gen. (Tdo')	7.9
Konstanta redaman (D0)	1.965
Penguatan Regulator Teg. ( $K_A$ )	200
Konstanta waktu reg. teg. ( $T_A$ )	0.25
Penguatan filter ( $K_F$ )	0.4
Konstanta waktu filter ( $T_F$ )	0.5
Penguatan Excitasi ( $K_E$ )	1
Konstanta waktu eksitasi ( $T_E$ )	0.98
Penguatan gov. uap ( $K_{gu}$ )	20
Konstanta waktu gov. uap ( $T_{gu}$ )	0.1
Konstanta waktuturbin uap ( $T_{tu}$ )	0.1
Konst. pengaturan turbin (R)	0.52

#### 4.3.2. Data Impedansi Saluran

Tabel 4.2. *Data Impedansi Saluran*

<b>IMPEDANSI SALURAN ANTARA SURALAYA (PLTU) - GANDUL</b>			
Tegangan Bus Suralaya	Resistansi (ohm/km/phs)	Reaktansi (ohm/km/phs)	Jarak (km)
502 kV	0.0126	0.4182	110.89



## 4.4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

### 4.4.1. Masukan gangguan 1

#### ☐ *Perubahan frekuensi*

Grafik keluaran frekuensi dengan kontrol adaptif swatara terlihat pada gambar 4.5. Terlihat bahwa perubahan frekuensi mengalami lonjakan pada saat  $t$  mendekati harga awal sedangkan menuju nol saat  $t$  semakin membesar. Perubahan frekuensi maksimum sebesar  $-5.5 \text{ E-4 pu}$ , sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk menuju nol adalah 10 detik.

Grafik keluaran frekuensi tanpa kontrol adaptif swatara terlihat pada gambar 4.5. Perubahan frekuensi maksimum sebesar  $5.2 \text{ E-3 pu}$ , sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk menuju nol adalah 175 detik.

#### ☐ *Perubahan tegangan*

Grafik keluaran tegangan terminal dengan kontrol adaptif swatara terlihat pada gambar 4.5. Terlihat bahwa perubahan tegangan terminal mengalami lonjakan pada saat  $t$  mendekati harga awal sedangkan menuju nol saat  $t$  semakin membesar. Perubahan tegangan terminal maksimum sebesar  $-2.65 \text{ E-4 pu}$ , sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk menuju nol adalah 20 detik.

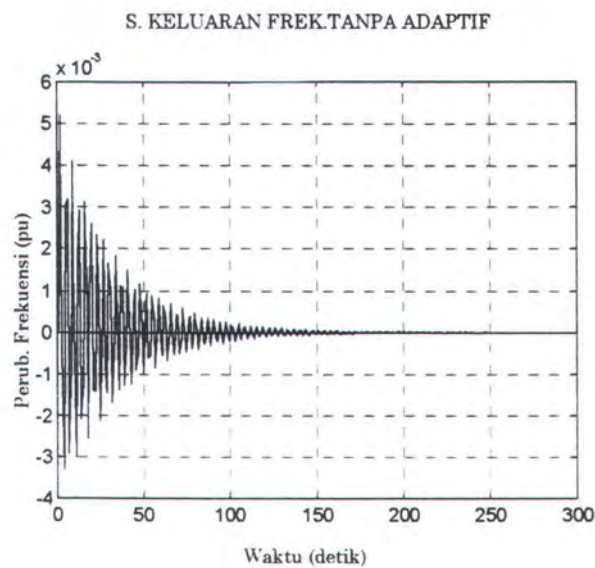
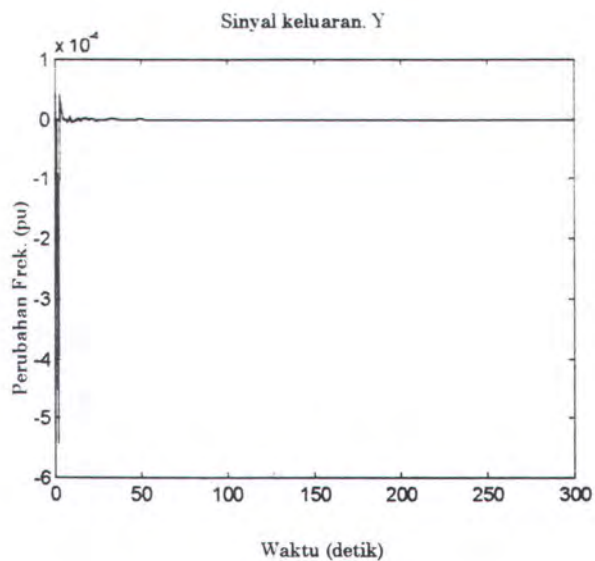
Grafik keluaran tegangan terminal tanpa kontrol adaptif swatara terlihat pada gambar 4.5. Perubahan tegangan terminal maksimum sebesar  $5 \text{ E-3 pu}$ , sedangkan waktu yang dibutuhkan untuk menuju nol adalah 90 detik.

Perbandingannya dapat dilihat pada tabel di bawah ini :

**Tabel 4.3.** *Perbandingan keluaran dengan dan tanpa kontrol adaptif dengan masukan gangguan 1.*

Keluaran	$\Delta P_L$ (pu)	Dengan Kontrol Adaptif		Tanpa Kontrol Adaptif	
		T. Redaman (detik)	Simpangan Maks. (pu)	T. Redaman (detik)	Simpangan Maks. (pu)
$\Delta\omega$	0.05	10	-5.5 E-4	175	5.2 E -3
$\Delta V_t$	0.05	20	-2.65E -4	90	5 E-3

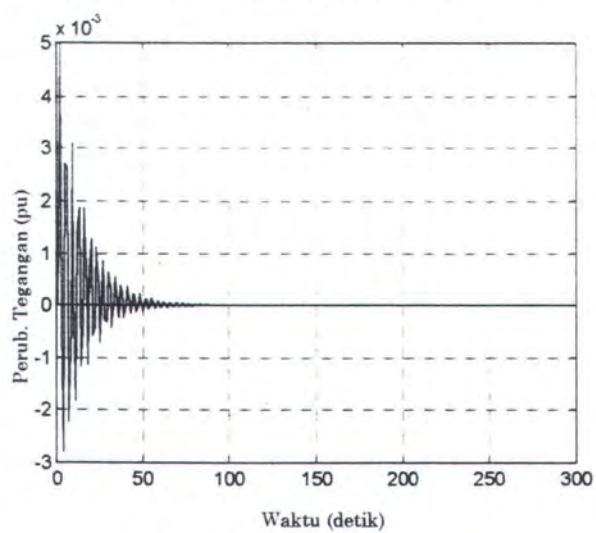




Keterangan : (a) menggunakan kontrol adaptif swatalla  
 (b) tanpa kontrol adaptif swatalla

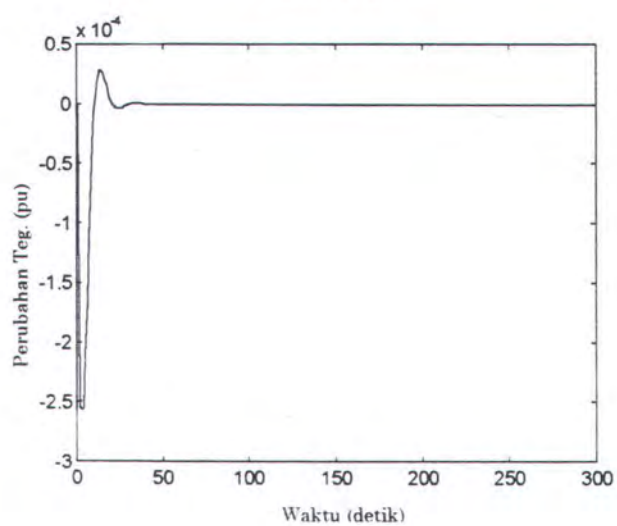
**Gambar 4.5.** Sinyal keluaran frekuensi dengan masukan gangguan 1

## S. KELUARAN TEG. TANPA ADAPTIF



(a)

## Sinyal keluaran, Y



(b)

Keterangan : (a) tanpa kontrol adaptif swatara

(b) menggunakan kontrol adaptif swatara

**Gambar 4.6.** Sinyal keluaran tegangan dengan masukan gangguan 1

#### 4.4.2. Masukan gangguan 2

Masukan gangguan ini merupakan perubahan daya beban pada sistem tenaga listrik mesin tunggal. Keluaran frekuensi dan tegangan dapat dilihat pada gambar 4.7. Terlihat bahwa setiap terjadi perubahan daya beban terjadi pula perubahan pada frekuensi dan tegangan. Pada saat terjadi peningkatan daya beban terjadi penurunan frekuensi dan tegangan. Tetapi dengan segera perubahan frekuensi dan tegangan kembali menuju harga nol. Demikian pula pada saat terjadi penurunan daya beban.

Keadaan pada kondisi di atas merupakan akibat dari penerapan kontrol adaptif swatala. Sebaliknya untuk keadaan tanpa kontrol adaptif swatala (open loop) adanya perubahan daya beban seperti di atas berakibat pada simpangan perubahan frekuensi dan tegangan yang relatif lebih besar serta waktu yang dipergunakan untuk kembali menuju harga nol yang relatif lebih lama. Untuk lebih jelasnya perbedaan antara respon dengan adaptif swatala dan tanpa adaptif swatala dapat dilihat tabel berikut ini :

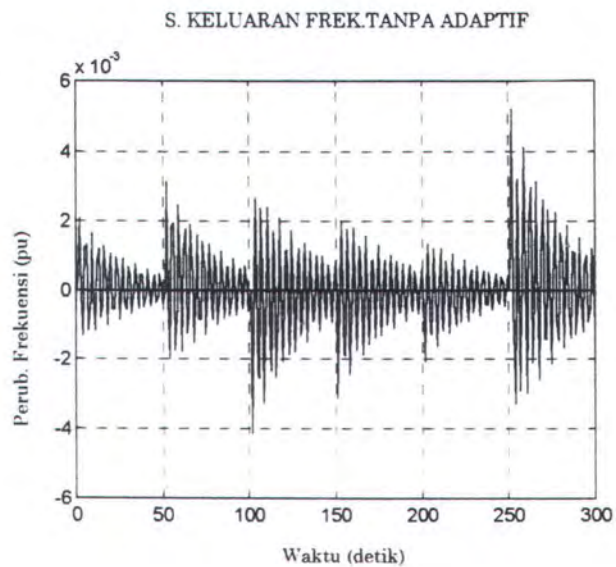
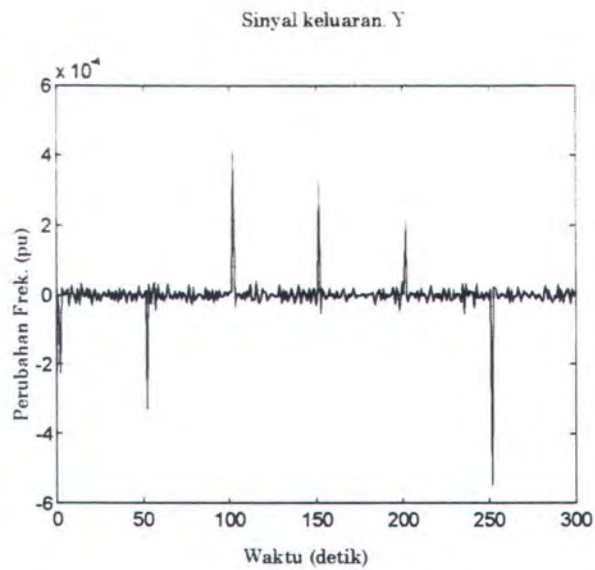


Tabel 4.4.a. Perbandingan Perubahan Frekuensi ( $\Delta\omega$ ) dengan masukan gangguan 2

$\Delta P_L$ (pu)	Dengan Kontrol Adaptif		Tanpa Kontrol Adaptif	
	Frekuensi ( $\Delta\omega$ )		Frekuensi ( $\Delta\omega$ )	
	T. Redaman (detik)	Lonjakan Maks (pu)	T. Redaman (detik)	Lonjakan Maks (pu)
0.02	5	-2.1E-4	50<	2E-3
0.03	5	-3.5E-4	50<	3.2E-3
-0.04	5	4E-4	50<	-4.2E-3
-0.03	5	3.75E-4	50<	-3.5E-3
-0.02	5	2.25E-4	50<	-2E-3
0.05	7	-5.8E-4	50<	5.5E-3

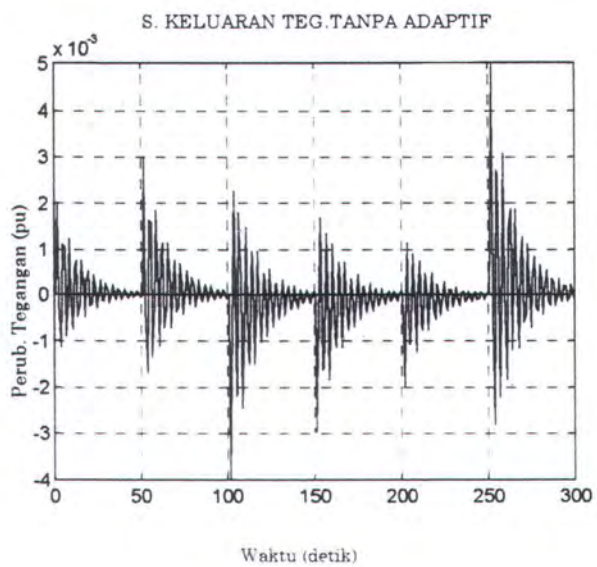
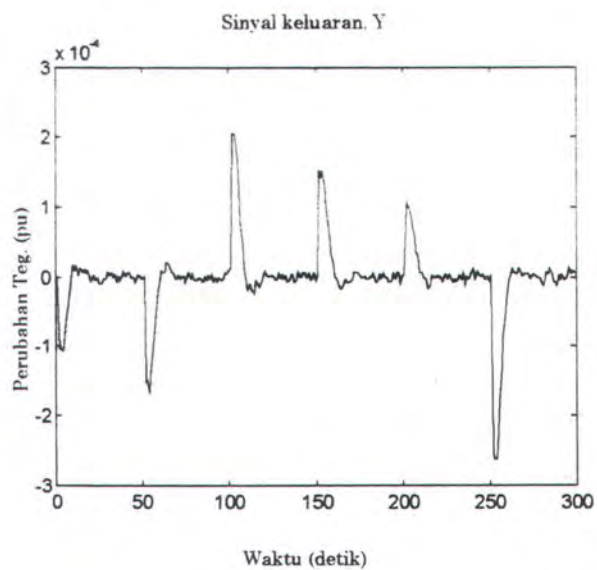
Tabel 4.4.b. Perbandingan Perubahan Tegangan Terminal ( $\Delta V_t$ ) dengan masukan gangguan 2

$\Delta P_L$ (pu)	Dengan Kontrol Adaptif		Tanpa Kontrol Adaptif	
	Tegangan Terminal ( $\Delta V_t$ )		Tegangan Terminal ( $\Delta V_t$ )	
	T. Redaman (detik)	Lonjakan Maks (pu)	T. Redaman (detik)	Lonjakan Maks (pu)
0.02	15	-1E-4	50<	2E-3
0.03	16	-1.75E-4	50<	2.9E-3
-0.04	15	2.2E-4	50<	-4E-3
-0.03	14	1.72E-4	50<	-3E-3
-0.02	15	1.2E-4	50<	-2E-3
0.05	16	-2.6E-4	50<	5E-3



Keterangan : (a) menggunakan kontrol adaptif swatata  
(b) tanpa kontrol adaptif swatata

**Gambar 4.7.** Sinyal keluaran frekuensi dengan masukan gangguan 2



Keterangan : (a) menggunakan kontrol adaptif swatara  
(b) tanpa kontrol adaptif swatara

**Gambar 4.8.** Sinyal keluaran tegangan dengan masukan gangguan 2



**Matriks koefisien variabel keadaan :**

$$A = \begin{bmatrix} -10 & 0 & 0 & -384.6154 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 10 & -10 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 6.2800 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1449 & -0.1562 & -0.2848 & -0.1541 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1452 & 0 & -0.4261 & 0.1266 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1.0204 & 0 & 1.0204 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -0.8163 & -2 & 2.0408 \\ 0 & 0 & -65.0857 & 0 & 384.1973 & 0 & -800 & -4 \end{bmatrix}$$

**Matriks koefisien variabel input :**

$$B = \begin{bmatrix} 200 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.1449 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 800 & 0 \end{bmatrix}$$

**Matriks pengukuran :**

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0779 & 0 & 1.0634 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0814 & 0 & 0.4352 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**Model ARMAX untuk sisi turbin :**

$$A(q^{-1}) = 1. - 0.6761 q^{-1} + 0.0389 q^{-2} - 0.0001 q^{-3}$$

$$B(q^{-1}) = 0.2206 q^{-1} - 0.2396 q^{-2} + 0.0191 q^{-3} - 0.0001 q^{-4}$$

$$C(q^{-1}) = 1. - 0.0109 q^{-1} + 0.0118 q^{-2} - 0.0009 q^{-3}$$

**Model ARMAX untuk sisi eksitasi :**

$$A(q^{-1}) = 1. - 0.01 q^{-1}$$

$$B(q^{-1}) = 0.5917 q^{-1} - 0.0008 q^{-2}$$

$$C(q^{-1}) = 1. + 0.5068 q^{-1} + 0.0006 q^{-2}$$

**Persamaan Regresi Frekuensi**

$$\begin{aligned} y(t) = & 0.6761 y(t-1) - 0.0389 y(t-2) + 0.0001 y(t-3) + 0.2206 \\ & u(t-2) - 0.2396 u(t-3) + 0.0191 u(t-4) - 0.0001 u(t-5) - \\ & 0.0109 e(t-1) + 0.0118 e(t-2) - 0.0009 e(t-3) \end{aligned}$$

**Persamaan Regresi Tegangan**

$$\begin{aligned} y(t) = & 0.01 y(t-1) + 0.5917 u(t-2) - 0.0008 u(t-3) + 0.5068 \\ & e(t-1) + 0.0006 e(t-2) \end{aligned}$$



# **TUGAS AKHIR**

**BAB V**

**PENUTUP**



## **BAB V**

### **PENUTUP**

#### **5.1. KESIMPULAN**

1. Penerapan kontrol adaptif swatala mampu memberikan hasil yang lebih baik di bandingkan tanpa menggunakan kontrol adaptif swatala. Dari tabel 4.3 dihasilkan untuk  $\Delta\omega$  waktu redaman diperkecil dari 175 detik menjadi 10 detik sedang amplitudonya diperkecil dari -0.0052 pu menjadi -0.00055 pu. Demikian pula untuk  $\Delta V_t$  waktu redaman diperkecil dari 90 detik menjadi 20 detik sedang amplitudonya diperkecil dari -0.005 pu menjadi -0.000265 pu.
2. Adanya gangguan white-noise pada sistem tenaga listrik mesin tunggal ternyata tidak dapat dihilangkan dengan menggunakan kontrol adaptif swatala.

#### **5.2. SARAN**

Untuk mendapatkan hasil yang maksimal dalam penerapan kontrol adaptif swatala pada sistem pembangkit listrik mesin tunggal terhubung dengan infinit bus, diperlukan adanya campur tangan bidang-bidang ilmu yang lain seperti pengukuran frekuensi, pengukuran tegangan, aliran daya dan bidang aplikasi perangkat keras.

Penelitian-penelitian lebih lanjut perlu diadakan agar diperoleh pemeodelan yang lebih mendekati keadaan yang sebenarnya.



# **TUGAS AKHIR**

**DAFTAR PUSTAKA**



## DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Anderson P.M. & Fouad A.A., **Power System Control and Stability**, The Iowa State University Press Ames, Iowa 50010, First Edition, 1977.
- [2]. Astrom, K.J. and Wittenmark, B, **Adaptive Control**, Addison Wesley Publishing Company, USA, 1989.
- [3]. Astrom, K.J. and Wittenmark, B, **Computer Controlled System Theory and Design**, Prentice-Hall International, Inc., 1984.
- [4]. De Mello E.P. and Concordia, **Concepts of Sysynchronous Machine Stability by Ecitation Control**, IEEE, Vol Pass-88, No. 4 , April 1996.
- [5]. Edy Suwanto, **Studi Pengendalian Adaptif Frekuensi-Beban Untuk Sistem Tenaga Area Jamak**, Tesis, ITB, 1995.
- [6]. IEEE Committee Report, **Dynamic Models for Steam and Hydro Turbine in Power System Studies**, IEEE Trans., 1973, Pas-92, pp. 1904-1915.
- [7]. IEEE Committee Report, **Excitation System Models Power System Studies**, IEEE Trans, Vol Pas-100, No. 2, Feb.1981.
- [8]. IEEE Committee Report, **Computer Representation of Exitation System**, IEEE Trans, Vol Pas-87, No. 6, June 1981.
- [9]. Imam Robandi, **Studi Perbaikan Kinerja Dinamik Sistem Tenaga Listrik Multimesin Dengan Umpan Balik Optimal**, Tesis, ITB, Nopember 1994



- [10]. Isnuwardianto, **Dinamika Kendali Sistem Tenaga Listrik**, ITB, 1994.
  
- [11]. Katsuhito Ogata, **State Space Analysis of Control Systems**, Prentice Hall inc., Englewood Cliff, New Jersey.
  
- [12]. Nagrath, I.J. and Kothari, D.P, **Modern Power System Analysis**, Tata Mc.Graw Hill, New Delhi, 1980.
  
- [13]. Narendra, K.S and Annaswamy, A.M, **Stable Adaptive System**, Prentice-Hall International, Inc., 1989.
  
- [14]. Pan, C.T and Liaw, C. M, **An Adaptive Controller for Power System Load Frequency Control**, IEEE Trans. on Power System, Vol. 4, No. 1, Feb. 1989.
  
- [15]. Sheirah, M.A, malik, O.P and Hope, G.S, **Minimum Variance strategy for Load Frequency Control**, Electric Power Energy System, Vol. 8, No. 2, April 1986.
  
- [16]. Stevenson, W.D. Jr, **Elemenof Power System Analysis**, 4<sup>th</sup> edition, Mc. Graw Hill, Inc., 1982.
  
- [17]. -----, **PC-MATLAB for MS-DOS Personal Computer**, The Math Works, Inc, Oktober 1990.

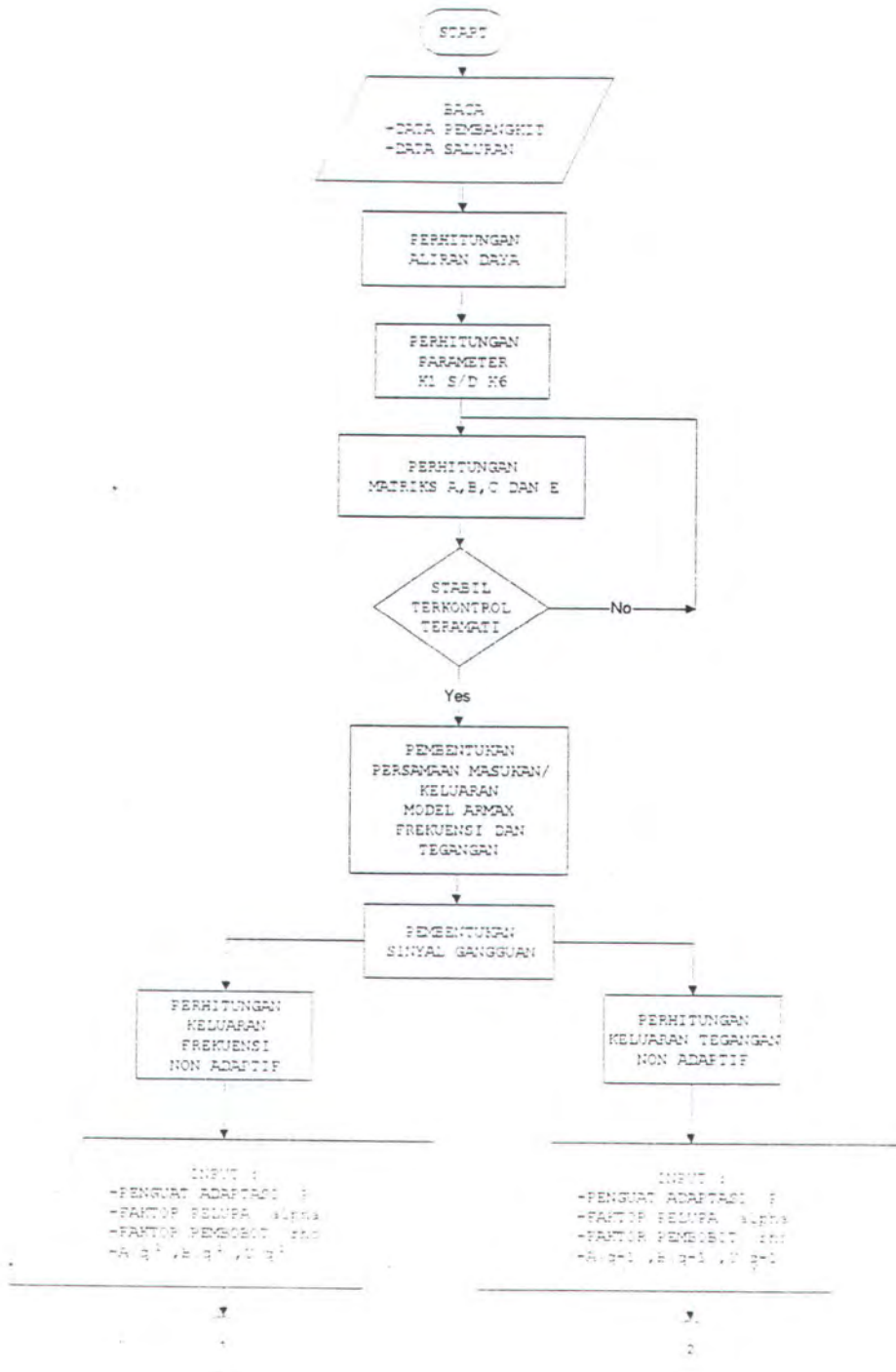


# **TUGAS AKHIR**

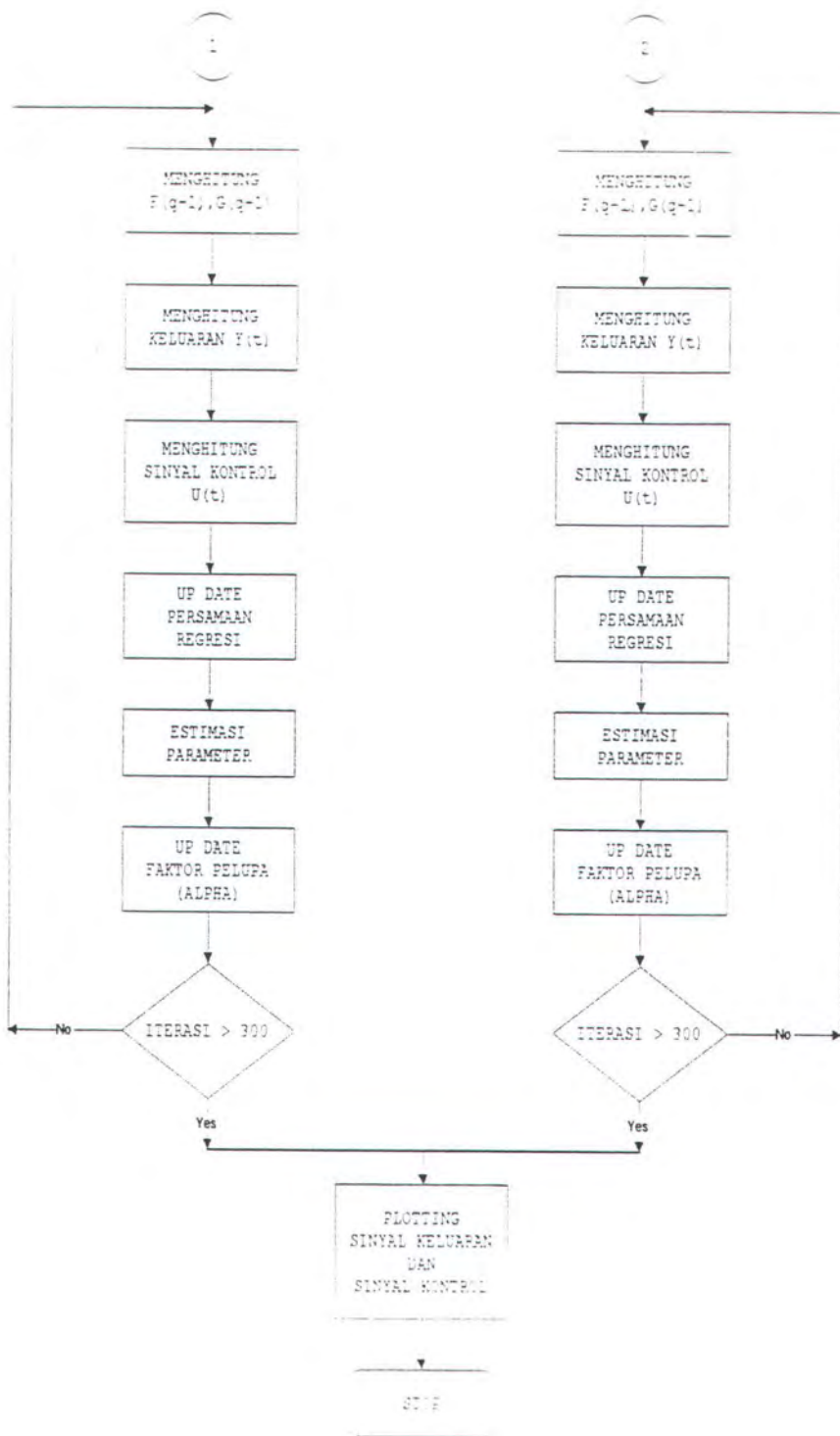
**LAMPIRAN A**



## LAMPIRAN A









# **TUGAS AKHIR**

**LAMPIRAN B**



## LAMPIRAN B

%DATA PENBANGKIT

%=====

clear

MWb=400;      %Daya maksimum yang dibangkitkan 3 phasa (MWatt)  
sebagai dasar

KVb=500;      %Tagangan pada jaringan transmisi line to line (KVolt)  
sebagai dasar

KV=502;      %Tagangan pada bus ganarator;

xd=1.7;

xq=1.64;

xda=0.245;

Lad=1.55;

r=0.001;

Fp=0.85;

%=====

Ka = 200;

Ta = 0.25;

Ke = 1.0;

Te = 0.98;

Kf = 0.4;

Tf = 0.5;

Kgu = 20;

Tgu = 0.1;

Ttu = 0.1;

M = 6.9;

Tdo = 7.9;

R = 0.52;

w0 = 6.28;

D1 = 1.965;

%DATA TRANSMISI

%=====

Km=110.98;    %Panjang saluran dari Suralaya ke Gandul

Re=0.0126;    %Reasistansi saluran ohm/km/phasa

Xe=0.4182;    %Reaktansi saluran ohm/km/phasa

Phs=3;        %Jumlah Phasa

%MENGHITUNG NILAI DASAR

%=====

Ib=MWb/(sqrt(3)\*KVb);

Zb=KVb\*KVb/MWb;

%MENGHITUNG IMPEDANSI TOTAL (pu)

%=====

Zt\_ohm=Km\*Phs\*(Re+j\*Xe);

Ztotal=Zt\_ohm/Zb;

%Ztotal=0.02+0.4i



```

%MENGHITUNG TEGANGAN TERMINAL (pu)
%=====
Vt=KV/KVb;

%MENGHITUNG Id,Iq,Vd,Vq (pu)
%=====
derajat=(180/pi);
Ia=Fp/(sqrt(3)*Vt);
fhi=acos(Fp);
Ir=Ia*cos(fhi);
Ix=-Ia*sin(fhi);
d_B=atan([(xq*Ir+r*Ix)/(Vt+r*Ir-xq*Ix)]);
dBf=d_B+fhi;

Iq=Ia*cos(dBf);
iq=Iq*sqrt(3);

Id=-Ia*sin(dBf);
id=Id*sqrt(3);

Vq=Vt*cos(d_B);
vq=Vq*sqrt(3);

Vd=-Vt*sin(d_B);
vd=Vd*sqrt(3);

%MENGHITUNG Vo (pu) dan sudut alfa-beta
%=====
Vinf=0.9439-0.0908i;
Vo=abs(Vinf);
alf_B=angle(Vinf);

%MENGHITUNG K1, K2, K3, K4, K5 dan K6
%=====
Zre=real(Ztotal);
Zxe=imag(Ztotal);
K1=1/((Zre)^2+(xq+Zxe)*(xda+Zxe));
K3=1/(1+K1*(xd-xda)*(xq-Zxe));

%=====
d_alf = d_B - alf_B;
K4=Vo*K1*(xd-xda)*[(xq-Zxe)*sin(d_alf) - Zre*cos(d_alf)];

%=====
Eaq=Vq-(xda*Id);
Eqa=Eaq-(xq-xda)*Id;
sukulK1=Eqa*[Zre*sin(d_alf)+(xda+Zxe)*cos(d_alf)];
suku2K1=Iq*(xq-xda)*[(xq+Zxe)*sin(d_alf)-Zre*cos(d_alf)];
K1=K1*Vo*[sukulK1+suku2K1];

%=====
K2=K1*[Iq*(Zre^2+(xq+Zxe)^2)+Eqa*Zre];

```

```
%=====
sukulK5=(K1*Vo*xda*Vq/Vt)*[(xq+Zxe)*sin(d_alf)-Zre*cos(d_alf)];
suku2K5=(K1*Vo*xq*Vd/Vt)*[(xda+Zxe)*cos(d_alf)+Zre*sin(d_alf)];
K5=sukulK5+suku2K5;
```

```
%=====
K6=(Vq/Vt)*[1-K1*xda*(xq+Zxe)]-(Vd/Vt)*K1*xq*Zre;
clc
```

```
%=====
disp('PARAMETER K1, K2, K3, K4, K5, K6');
K=[K1 K2 K3 K4 K5 K6]
disp('-----tekan enter-----')
pause
clc
```

```
%Matriks Variabel Keadaan A
```

```
%=====
disp('Matriks Variabel Keadaan A');
A=[-1/Tgu 0 0 -Kgu/(R*Tgu) 0 0 0 0;
1/Ttu -1/Ttu 0 0 0 0 0 0;
0 0 0 w0 0 0 0 0;
0 1/M -K1/M -D1/M -K2/M 0 0 0;
0 0 -K4/Tdo 0 -1/(K3*Tdo) 1/Tdo 0 0;
0 0 0 0 0 0 -Ke/Te 0 1/Te;
0 0 0 0 -Ke*Kf/(Tf*Te) -1/Tf Ke/(Te*Tf);
0 0 K5*Ka/Ta 0 K6*Ka/Ta 0 -Ka/Ta -1/Ta]
disp('-----tekan enter-----')
pause
clc
```

```
%Matriks Variabel Input B
```

```
%=====
disp('Matriks Variabel Input B');
B=[Kgu/Tgu 0 0;
0 0 0;
0 0 0;
0 0 -(1/M);
0 0 0;
0 0 0;
0 0 0;
0 Ka/Ta 0]
disp('-----tekan enter-----')
pause
clc
```

```
%Matriks Pengukuran C
```

```
%=====
disp('Matriks Pengukuran C');
C=[1 0 0 0 0 0 0 0;
0 1 0 0 0 0 0 0;
0 0 K1 0 K2 0 0 0;
```

```

0      0      0      1      0      0      0      0;
0      0      K5     0      K6     0      0      0;
0      0      0      0      0      1      0      0;
0      0      0      0      0      0      1      0;
0      0      0      0      0      0      0      1]
disp('-----tekan enter-----')
pause
clc

C1=C(4,:);
C2=C(5,:);
D=zeros(1,3);

%MENGUJI KONDISI MATRIKS KEADAAN
%=====

disp('MATRIS STABIL BILA "REAL DARI EIG(A)=NEGATIP");
EIG=eig(A)

disp('MATRIS TERAMATI BILA "ROBSC=8");
OBSC=obsv(A,C);
ROBSC=rank(OBSC)

disp('MATRIS TERKONTROL BILA "RANGCO=8");
CO=ctrb(A,B);
RANKCO=rank(CO)
disp('-----tekan enter-----')
pause
clc

%MENENTUKAN FUNGSI ALIH SISTEM DALAM BENTUK KONTINYU
%=====
disp('FUNGSI ALIH SISI TURBIN DALAM BENTUK KONTINYU')
[num1,den]=ss2tf(A,B,C1,D,1) %bentuk kontinyu
disp('-----tekan enter-----')
%pause
clc
disp('FUNGSI ALIH SISI EKSITASI DALAM BENTUK KONTINYU')
[num2,den]=ss2tf(A,B,C2,D,2) %bentuk kontinyu
disp('-----tekan enter-----')
%pause
clc
disp('FUNGSI ALIH GANGGUAN DALAM BENTUK KONTINYU')
[num3f,den]=ss2tf(A,B,C1,D,3) %bentuk kontinyu
disp('-----tekan enter-----')
%pause
clc
disp('FUNGSI ALIH GANGGUAN DALAM BENTUK KONTINYU')
[num3t,den]=ss2tf(A,B,C2,D,3) %bentuk kontinyu
disp('-----tekan enter-----')
%pause
clc

Ts=0.35;

```



```

%MENENTUKAN FUNGSI ALIH SISTEM DALAM BENTUK DISKRIT
%=====
disp('FUNGSI ALIH SISI TURBIN DALAM BENTUK DISKRIT')
[numd1,dend]=c2dm(num1,den,Ts) %bentuk diskrit
disp(' (-----tekan enter-----) ')
%pause
clc
disp('FUNGSI ALIH SISI EKSITASI DALAM BENTUK DISKRIT')
[numd2,dend]=c2dm(num2,den,Ts) %bentuk diskrit
disp(' (-----tekan enter-----) ')
%pause
clc
disp('FUNGSI ALIH GANGGUAN DALAM BENTUK DISKRIT')
[numd3f,dend]=c2dm(num3f,den,Ts) %bentuk diskrit
disp(' (-----tekan enter-----) ')
%pause
clc
disp('FUNGSI ALIH GANGGUAN DALAM BENTUK DISKRIT')
[numd3t,dend]=c2dm(num3t,den,Ts) %bentuk diskrit
disp(' (-----tekan enter-----) ')
%pause
clc

%MENENTUKAN JENIS SINYAL GANGGUAN
%=====
clc
niter=300;
% m=input('Banyaknya iterasi ? (kelipatan 6; default=300) ');
m=300;
    if m<niter,nit=m;
        else nit=niter;
    end
t1=(1:nit/6)';
t2=(nit/6+1:nit/3)';
t3=(nit/3+1:nit/2)';
t4=(nit/2+1:nit/3*2)';
t5=(nit/3*2+1:nit/6*5)';
t6=(nit/6*5+1:nit)';
t=[t1' t2' t3' t4' t5' t6']';
tnon=t;
ee0=zeros(nit,1);
ee10=ones(nit,1);
ee1=.04*randn(size(t));
ee2=.1*ee10;
ee20=.5*ee2;
ee21=.6*ee2;
    ee4=.2*ee2(t1)+.001*randn(size(t1));
    ee5=.5*ee2(t2)+.001*randn(size(t2));
    ee6=.1*ee2(t3)+.001*randn(size(t3));
    ee7=-.2*ee2(t4)+.001*randn(size(t4));
    ee8=-.4*ee2(t5)+.001*randn(size(t5));
    ee9=.1*ee2(t6)+.001*randn(size(t6));
ee3=[ee4' ee5' ee6' ee7' ee8' ee9]';
figure(1)
subplot(211),plot(t,ee0,t,ee20,t,ee21),title('sinyal gangguan
1'),%gangguan unit step

```

```

ylabel('Perubahan Beban (pu)'),xlabel('Waktu (detik)')
subplot(212),plot(t,ee3,t,ee0),title('sinyal gangguan
2'),%gangguan unit step beramplitudo
ylabel('Perubahan Beban (pu)'),xlabel('Waktu (detik)')
clc

```

```

%MEMILIH JENIS SINYAL GANGGUAN

```

```

%=====

```

```

%mm=input('S.gangguan,(1=step,2=step beramplitudo) = ');
mm=1;

```

```

D=zeros(8,1);
Mod=6;
Dl=0.01;
Ttu=3.1;
Mdl=(1/Mod);
AUf=[-1/Tgu    0    0    -Kgu/(R*Tgu)    0    0    0    0;
1/Ttu -1/Ttu 0    0    0    0    0    0;
0    0    0    w0    0    0    0    0;
0    1/Mod -K1/Mod -D1/Mod -K2/Mod 0    0    0;
0    0 -K4/Tdo    0 -1/(K3*Tdo) 1/Tdo 0    0;
0    0    0    0    0 -Ke/Te    0    1/Te;
0    0    0    0 -Ke*Kf/(Tf*Te) -1/Tf Ke/(Te*Tf);
0    0 K5*Ka/Ta    0    K6*Ka/Ta    0 -Ka/Ta -1/Ta];

```

```

if mm==1,err=ee20;

```

```

BGANGGUANf=[0 ;

```

```

0 ;

```

```

0 ;

```

```

.5*Mdl;

```

```

0 ;

```

```

0 ;

```

```

0 ;

```

```

0 ];

```

```

[y1f,x1f]=step(AUf,BGANGGUANf(:,1),C,D,1,t);

```

```

Ynonf=y1f(:,4);

```

```

else err=ee3;

```

```

BGANGGUANf=[0    0    0    0    0    0;

```

```

0    0    0    0    0    0;

```

```

0    0    0    0    0    0;

```

```

.2*Mdl .3*Mdl -.4*Mdl -.3*Mdl -.2*Mdl .5*Mdl;

```

```

0    0    0    0    0    0;

```

```

0    0    0    0    0    0;

```

```

0    0    0    0    0    0;

```

```

0    0    0    0    0    0];

```

```

[y1f,x1f]=step(AUf,BGANGGUANf(:,1),C,D,1,t1);

```

```

[y2f,x2f]=step(AUf,BGANGGUANf(:,2),C,D,1,t2);

```

```

[y3f,x3f]=step(AUf,BGANGGUANf(:,3),C,D,1,t3);

```

```

[y4f,x4f]=step(AUf,BGANGGUANf(:,4),C,D,1,t4);

```

```

[y5f,x5f]=step(AUf,BGANGGUANf(:,5),C,D,1,t5);

```

```

[y6f,x6f]=step(AUf,BGANGGUANf(:,6),C,D,1,t6);

```

```

Yout1f=y1f(:,4);

```

```

Yout2f=y2f(:,4);

```

```

Yout3f=y3f(:,4);

```

```

Yout4f=y4f(:,4);

```

```

Yout5f=y5f(:,4);

```

```

Yout6f=y6f(:,4);
Ynonf=[Yout1f' Yout2f' Yout3f' Yout4f' Yout5f' Yout6f'];
end

D=zeros(8,1);
Mod=6;
Dl=0.5;
Ttu=3.1;
Mdl=(1/Mod);

AUt=[-1/Tgu      0      0      -Kgu/(R*Tgu)      0      0      0      0;
      1/Ttu     -1/Ttu      0      0      0      0      0      0;
      0      0      0      w0      0      0      0      0;
      0      1/Mod     -K1/Mod     -Dl/Mod     -K2/Mod      0      0      0;
      0      0     -K4/Tdo      0     -1/(K3*Tdo)      1/Tdo      0      0;
      0      0      0      0      0     -Ke/Te      0      1/Te;
      0      0      0      0     -Ke*Kf/(Tf*Te)     -1/Tf      Ke/(Te*Tf);
      0      0     K5*Ka/Ta      0      K6*Ka/Ta      0     -Ka/Ta     -1/Ta];

if mm==1,err=ee20;
    BGANGGUANT=[0 ;
                0 ;
                0 ;
                .5*Mdl;
                0 ;
                0 ;
                0 ;
                0 ];
    [y1t,x1t]=step(AUt,BGANGGUANT(:,1),C,D,1,t);
    Ynont=y1t(:,4);

else err=ee3;
    BGANGGUANT=[0      0      0      0      0      0;
                0      0      0      0      0      0;
                0      0      0      0      0      0;
                .2*Mdl .3*Mdl -.4*Mdl -.3*Mdl -.2*Mdl .5*Mdl;
                0      0      0      0      0      0;
                0      0      0      0      0      0;
                0      0      0      0      0      0;
                0      0      0      0      0      0];
    [y1t,x1t]=step(AUt,BGANGGUANT(:,1),C,D,1,t1);
    [y2t,x2t]=step(AUt,BGANGGUANT(:,2),C,D,1,t2);
    [y3t,x3t]=step(AUt,BGANGGUANT(:,3),C,D,1,t3);
    [y4t,x4t]=step(AUt,BGANGGUANT(:,4),C,D,1,t4);
    [y5t,x5t]=step(AUt,BGANGGUANT(:,5),C,D,1,t5);
    [y6t,x6t]=step(AUt,BGANGGUANT(:,6),C,D,1,t6);
    Yout1t=y1t(:,4);
    Yout2t=y2t(:,4);
    Yout3t=y3t(:,4);
    Yout4t=y4t(:,4);
    Yout5t=y5t(:,4);
    Yout6t=y6t(:,4);
    Ynont=[Yout1t' Yout2t' Yout3t' Yout4t' Yout5t' Yout6t'];
end

```



```

figure(2)
plot(t,err,t,ee0),title('Sinyal gangguan');
ylabel('Perubahan Beban (pu)'),xlabel('Waktu (detik)'),grid;
pause

figure(3)
plot(t,0.1*Ynonf,'y',t,ee0,'r'),title('S. KELUARAN FREK.TANPA ADAPTIF'),
ylabel('Perub. Frekuensi (pu)'),xlabel('Waktu (detik)'),grid;

figure(4)
plot(t,0.1*Ynont,'y',t,ee0,'r'),title('S. KELUARAN FREK.TANPA ADAPTIF'),
ylabel('Perub. Tegangan (pu)'),xlabel('Waktu (detik)'),grid;

disp('====PROSES ESTIMASI PARAMETER DAN KONTROL ADAPTIF SWATALA====')
disp('')

P0=input('penguatan adaptasi awal, P(0)= ');
alpha=input('Faktor pengabai, alpha=[alpha0 alpha1(0)] ');
alpha10=alpha(2); %alpha10 berisi kolom ke 2 dari matriks alpha
P=P0/det(alpha10);
alpha1(1)=1-alpha(1)+alpha(1)*alpha10;
aestf=[1 -1.6 .55 .04 .09 -.01 0.0896 0.0902 0.1858];
bestf=[0 .1 -.15 1.8 .03 .05 0.2836 0.4768 0.0781];
cestf=[1 -0.7 -.002 .05 -.23 -.02 0.4473 -0.1527 0.1860];
thf=[aestf(1,2:9) bestf(1,2:9) cestf(1,2:9)]';
aestt=[1 -1.2 ];
bestt=[0 .3 -.3 ];
cestt=[1 -.02 -.06];
tht=[aestt(1,2) bestt(1,2:3) cestt(1,2:3)]';
rho=input('konstanta pengendali, rho= ');

%MENGHITUNG PARAMETER SINYAL KENDALI
%=====
[Ff,Gf]=deconv(cestf,aestf);
BFf=conv(bestf,Ff);
Lf=rho/bestf(1,2);
CLf=conv(cestf,Lf);
CLBFf=CLf+[BFf(1,2:9) 0];

[Ft,Gt]=deconv(cestt,aestt);
BFt=conv(bestt,Ft);
Lt=rho/bestt(1,2);
CLt=conv(cestt,Lt);
CLBFt=CLt+[BFt(1,2:4)];

Pf=P0*eye(24);
Pestf(1)=P(1,1);
psif=zeros(24,1);
yyf=ee0;
uuf=ee0;

```

```

Rf=ee0;
eef=ee0;
uf=ee0;

Pt=P0*eye(5);
Pestt(1)=P(1,1);
psit=zeros(5,1);
yyt=ee0;
uut=ee0;
Rt=ee0;
eet=ee0;
ut=ee0;

yolf=filter(numd1,dend,uuf);
yo3f=filter(numd3f,dend,err);
yf=yolf+yo3f;
yyf(1)=yf(1);
ulf=filter(Gf,CLBFf,-yyf);
uulf(1)=ulf(1);
Rlf=filter(cestf,CLBFf,Rf);
u2f=ulf+Rlf;
uf=filter([1],[1 -1],u2f);
    psif(1)=-yyf(1);
    erf=yyf(1);
uuf(1)=uf(1);
eef(1)=erf(1);

yo2t=filter(numd2,dend,uut);
yo3t=filter(numd3t,dend,err);
yt=yo2t+yo3t;
yyt(1)=yt(1);
ult=filter(Gt,CLBFt,-yyt);
uult(1)=ult(1);
Rlt=filter(cestt,CLBFt,Rt);
u2t=ult+Rlt;
ut=filter([1],[1 -1],u2t);
    psit(1)=-yyt(1);
    ert=yyt(1);
uut(1)=ut(1);
eet(1)=ert(1);

st=1:nit;
for i=2:nit;
    fqf=psif'*Pf*psif;
    er0f(i)=yyf(i-1)-thf'*psif;
    fgef=Pf*psif*er0f(i);
    Penf=alpha1(i-1)+fqf;
    Pentf=1+fqf;
    fqqf=Pf*psif*psif'*Pf;
    fkf=fqqf/det(Penf);
    dkf=Pf-fkf;
    Pf=dkf/det(alpha1(i-1));
    Pestf(i)=Pf(1,1);
    if Pestf(i)<=0 break;
    end
    fkttf=fgef/det(Pentf);

```

```

thf=thf+fkttf;

fqt=psit'*Pt*psit;
er0t(i)=yyt(i-1)-tht'*psit;
fget=Pt*psit*er0t(i);
Pent=alpha1(i-1)+fqt;
Pentt=1+fqt;
fqqt=Pt*psit*psit'*Pt;
fkt=fqqt/det(Pent);
dkt=Pt-fkt;
Pt=dkt/det(alpha1(i-1));
Pestt(i)=Pt(1,1);
    if Pestt(i)<=0 break;
end
fkttt=fget/det(Pentt);
tht=tht+fkttt;

aestf=[1 thf(1:8,1)'];
bestf=[0 thf(9:16,1)'];
cestf=[1 thf(17:24,1)'];
aelf(i)=thf(1,1);ae2f(i)=thf(2,1);
ae3f(i)=thf(3,1);ae4f(i)=thf(4,1);ae5f(i)=thf(5,1);
belf(i)=thf(9,1);be2f(i)=thf(7,1);be3f(i)=thf(8,1);
be4f(i)=thf(9,1);be5f(i)=thf(10,1);
celf(i)=thf(11,1);ce2f(i)=thf(12,1);ce3f(i)=thf(13,1);
ce4f(i)=thf(14,1);ce5f(i)=thf(15,1);

aestt=[1 tht(1,1)'];
bestt=[0 tht(2:3,1)'];
cestt=[1 tht(4:5,1)'];
aelt(i)=tht(1,1);
belt(i)=tht(2,1);be2t(i)=tht(3,1);
celt(i)=tht(4,1);ce2t(i)=tht(5,1);

[Ff,Gf]=deconv(cestf,aestf);
BFf=conv(bestf,Ff);
Lf=rho/bestf(1,2);
CLf=conv(cestf,Lf);
CLBFf=CLf+[BFf(1,2:9) 0];

[Ft,Gt]=deconv(cestt,aestt);
BFt=conv(bestt,Ft);
Lt=rho/bestt(1,2);
CLt=conv(cestt,Lt);
CLBFt=CLt+[BFt(1,2:4)];

yolf=filter(numd1,dend,uuf);
yf=yolf+yo3f;
yyf(i)=yf(i);
ulf=filter(Gf,CLBFf(1,:),-yyf);
uulf(i)=ulf(i);
Rlf=filter(cestf,CLBFf,Rf);
u2f=Rlf+ulf;
uf=filter([1],[1 -1],u2f);
- erf(i)=yyf(i)-thf'*psif;
uuf(i)=uf(i);

```



```

    eef(i)=erf(i);
    psif(1)=-yyf(i);
    psif(2)=-yyf(i-1);
    psif(9)=uuf(i-1);
    psif(17)=eef(i);
    psif(18)=eef(i-1);
    if i<3 psif(3)=0;psif(10)=0;psif(19)=0;
        else psif(3)=-yyf(i-2);
            psif(10)=uuf(i-2);
            psif(19)=eef(i-2);
    end

    if i<4 psif(4)=0;
        psif(11)=0;
        psif(20)=0;
        else psif(4)=-yyf(i-3);
            psif(11)=uuf(i-3);
            psif(20)=eef(i-3);
    end

    if i<5 psif(5)=0;
        psif(12)=0;
        psif(21)=0;
        else psif(5)=-yyf(i-4);
            psif(12)=uuf(i-4);
            psif(21)=eef(i-4);
    end

    if i<6 psif(6)=0;
        psif(13)=0;
        psif(22)=0;
        else psif(6)=-yyf(i-5);
            psif(13)=uuf(i-5);
            psif(22)=eef(i-5);
    end

    if i<7 psif(7)=0;
        psif(14)=0;
        psif(23)=0;
        else psif(7)=-yyf(i-6);
            psif(14)=uuf(i-6);
            psif(23)=eef(i-6);
    end

    if i<8 psif(8)=0;
        psif(15)=0;
        psif(24)=0;
        else psif(8)=-yyf(i-7);
            psif(15)=uuf(i-7);
            psif(24)=eef(i-7);
    end

    if i<9 psif(16)=0;
        else psif(16)=uuf(i-8);
    end

    yo2t=filter(numd2,dend,uut);
    yt=yo2t+yo3t;
    yyt(i)=yt(i);
    ult=filter(Gt,CLBFt(1,:),-yyt);
    uult(i)=ult(i);

```

```

R1t=filter(cestt,CLBFt,Rt);
u2t=R1t+ult;
ut=filter([1],[1 -1],u2t);
ert(i)=yyt(i)-tht'*psit;
uut(i)=ut(i);
eet(i)=ert(i);
psit(1)=-yyt(i);
psit(2)=uut(i-1);
psit(4)=eet(i);
psit(5)=eet(i-1);
if i<3 psit(3)=0;
    else psit(3)=uut(i-2);
end

alpha1(i)=1-alpha(1)+alpha(1)*alpha1(i-1);
end;

yyff=yyf;
uuff=uuf;
yytt=-yyt/100;
uutt=-uut/100;

figure(5)
plot(st,yyff(st)),title('Sinyal keluaran, Y')
ylabel('Perubahan Frek. (pu)'),xlabel('Waktu (detik)')

figure(6)
plot(st,ee0(st),st,uuff(st)),title('Sinyal Kendali Frek., U')
ylabel('Amplitudo (pu)'),xlabel('Waktu (detik)')

figure(7)
plot(st,yytt(st)),title('Sinyal keluaran, Y')
ylabel('Perubahan Teg. (pu)'),xlabel('Waktu (detik)')

figure(8)
plot(st,ee0(st),st,uutt(st)),title('Sinyal Kendali Teg., U')
ylabel('Amplitudo (pu)'),xlabel('Waktu (detik)')

```



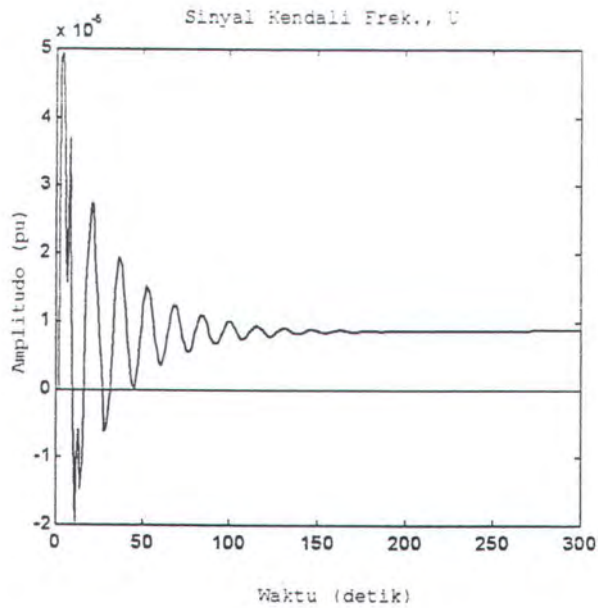


# **TUGAS AKHIR**

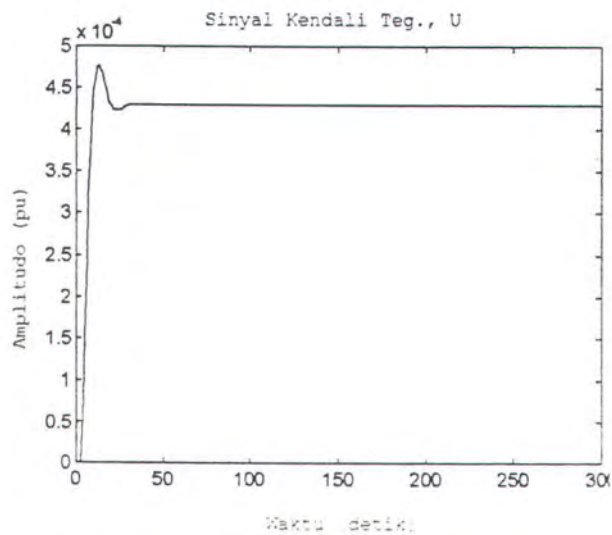
**LAMPIRAN C**



## LAMPIRAN C

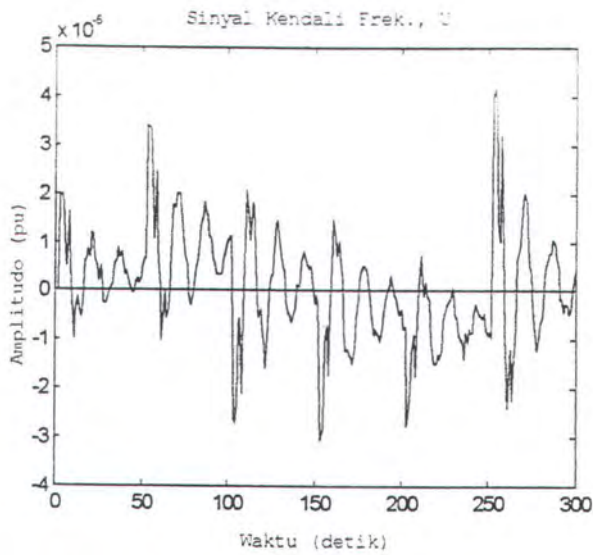


(a)

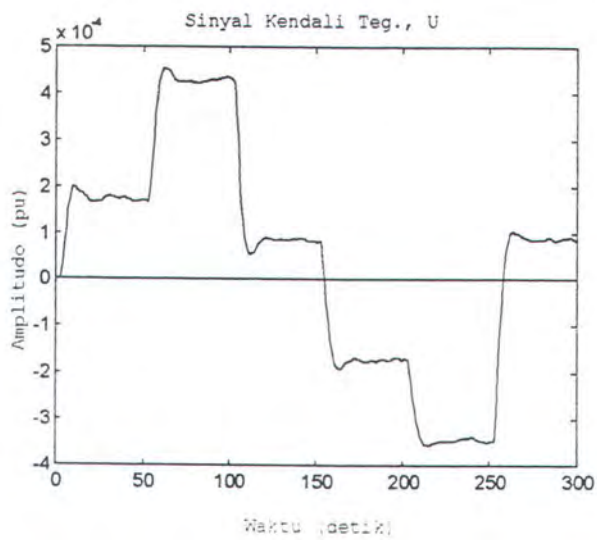


(b)

**Gambar :** (a). Sinyal Kendali Frekuensi dengan Input Sinyal Gangguan 1  
(b). Sinyal Kendali Tegangan dengan Input Sinyal Gangguan 1



(a)



(b)

**Gambar :** (a). Sinyal Kendali Frekuensi dengan Input Sinyal Gangguan 2  
(b). Sinyal Kendali Tegangan dengan Input Sinyal Gangguan 2



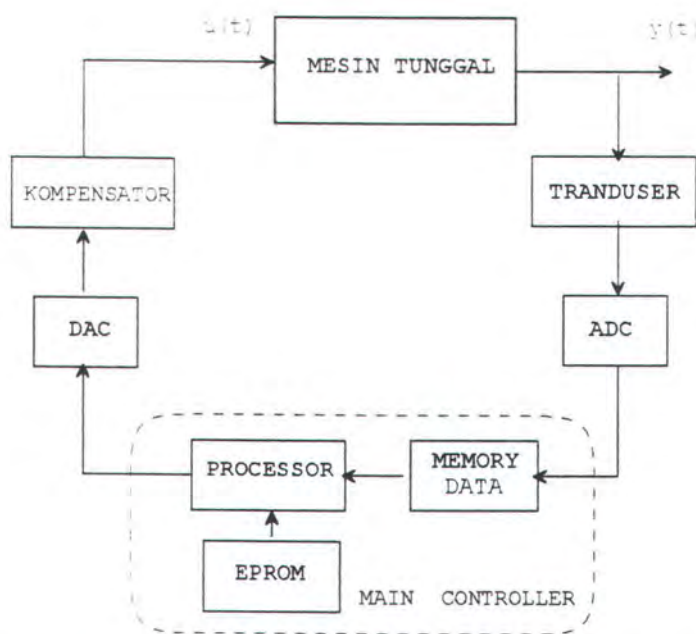


# **TUGAS AKHIR**

**LAMPIRAN D**



## LAMPIRAN D



*Gambar diagram blok peralatan pengendalian frekuensi dan tegangan menggunakan kontrol adaptif swatela*

dengan,

- ✓  $u(t)$  adalah sinyal kontrol frekuensi dan tegangan
- ✓  $y(t)$  adalah sinyal keluaran frekuensi dan tegangan
- ✓ *Tranduser* adalah berupa frekuensi counter dan potensial transformer (PT)
- ✓ *Kompensator* berupa motor dan potensial transformer
- ✓ *ADC* adalah alat untuk mengubah sinyal analog ke sinyal digital
- ✓ *DAC* adalah alat untuk mengubah sinyal digital ke sinyal analog
- ✓ *Memory Data* adalah alat untuk menyimpan data yang diperoleh dari sinyal keluaran, sinyal masukan dan harga acuan.

- ✓ *EPROM* adalah Erasable Programable Read Only Memory merupakan alat yang berisi program estimasi parameter dan perhitungan sinyal kontrol menggunakan metode adaptif swatara.
- ✓ *Processor* adalah pengolah program-program yang ada pada EPROM dengan menggunakan data-data yang telah disimpan dalam Memory Data.